



Evaluación de bioaerosoles desde un relleno sanitario en el departamento del Atlántico

Elías González Vallejo
Melissa Paola Campo Tatis

Corporación Universidad de la Costa
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental
Barranquilla, Colombia
2016

Evaluación de bioaerosoles desde un relleno sanitario en el departamento del Atlántico

Elías González Vallejo
Melissa Paola Campo Tatis

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero
Ambiental

Directora:
Esp. Wendy Beatriz Morgado Gamero
Codirector:
M. Sc. Andrés M. Vélez-Pereira

Corporación Universidad de la Costa
Facultad de Ciencias Ambientales
Ingeniería Ambiental
Barranquilla, Colombia
2016

Nota de aceptación:

4.53 cuatro punto
cinuenta y tres.

WBMG .

Firma del presidente del jurado

Liliana Lozano A.

Firma del jurado

Margarita Castillo

Firma del jurado

Barranquilla, 18/03/2016



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO
UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

ACTA N°: 14
DE SUSTENTACIÓN DE PROYECTO DE GRADO

En la Universidad de la Costa, CUC, siendo las 10:30 a.m. horas, del día 17 de Marzo del año 2016 en cumplimiento de lo señalado en el Acuerdo 237, se presentó el(los) estudiante(s): Elias González Vallejo.

Melissa Paola Campo Tatis.

Con el fin de sustentar el proyecto de grado titulado:
EVALUACIÓN DE BIOAREOSOLAS DESDE UN RELLENO SANITARIO EN EL DEPARTAMENTO DEL ATLÁNTICO.

Firma del(los)
interesado(s)

Elias González Vallejo
Melissa Paola Campo Tatis

Ante el comité evaluador, integrado por:

Asesor: Wendy Morgado Gamero.

Co-asesor: Andres Vélez Pereira

Evaluador: Lilliana Lozano Ayarza.

Evaluador: Margarita Castillo Ramírez.

Concluida la presentación y la defensa oral, el comité evaluador dictaminó otorgarle una calificación de* 4,53

El Director de Programa le hizo saber al sustentante el resultado obtenido

Wendy Morgado Gamero

Nombre de Asesor

Lilliana Lozano Ayarza

Nombre de evaluador

Margarita Castillo Ramírez

Nombre de evaluador

Wendy Morgado Gamero

Director de Programa

*Opciones de calificación: cinco, cuatro, tres, no aprobada, incompleto

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía, líder y razón de ser.

A mis padres Eddie González y Beatriz Vallejo por su incondicional apoyo durante esta etapa de mi vida, fueron ellos quienes me motivaron para ser quien soy hoy.

A mi hermano Emanuel González por todas sus enseñanzas que me han permitido ser una mejor persona, sin él no hubiese sido posible llegar hasta este punto del largo camino de la vida.

A mi estimada mentora, colega y segunda madre Geinny Vásquez quien me ha dado sabios consejos que han logrado que el rumbo de mi vida indique la dirección idónea.

A mi compañera Melissa Campo por enseñarme el significado de la palabra paciencia y su importancia en la vida, gracias a ella he tomado decisiones que me han permitido crecer personalmente.

Elías González Vallejo

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía y porque fue Él quien me llenó de fuerzas y sabiduría para el desarrollo de este trabajo.

A mis padres Emma y Jorge Luís por apoyarme en el recorrido de este camino y por la confianza que me brindaron en todo momento. Por ustedes hoy soy quien soy y por eso mi triunfo es para ustedes.

A mi hermana Natalia por su impecable disposición para escucharme y su inigualable compañía en momentos de felicidad y momentos difíciles. A mi hermano Jorge por siempre querer saber de lo que hago y aprender de ello.

A mi compañero Elías González por ser mi apoyo durante todo este trabajo y por darme ánimos para salir adelante.

Melissa Paola Campo Tatis

Agradecimientos

A nuestras familias por el apoyo incondicional durante todo el proceso de aprendizaje para alcanzar las metas planteadas.

A Esp. Wendy Beatriz Morgado Gamero y a M. Sc. Andrés M. Vélez-Pereira, Directora y Codirector de nuestro Proyecto de Grado, por sus enseñanzas, respaldo y todo el apoyo para cumplir este sueño.

A nuestro gran mentor Juan Carrascal por guiarnos siempre que lo necesitábamos y estar dispuesto a instruirnos con sus conocimientos de manera incondicional.

A M. Sc. Oscar Cortez Diart por apoyarnos sin condición durante el proceso de desarrollo de la presente investigación.

A la Universidad de la Costa por colaborarnos con todas las herramientas educativas e instalaciones para desarrollar este proyecto.

A nuestros compañeros de muestreos Claudia Carvajal y Yasser Barraza por su inigualable compañía y colaboración, sin ustedes esto no hubiese sido posible.

A las laboratoristas Erika Arbeláez y Ana Belén Villalobos por su colaboración y disposición para ayudarnos.

A la empresa que nos permitió el acceso a sus instalaciones en el relleno sanitario objeto de estudio.

A nuestros estimados amigos y amigas.

Resumen

Los bioaerosoles son partículas de origen biológico que pueden ser generados y dispersados por distintas fuentes en altas concentraciones, como las estaciones depuradoras de aguas residuales, rellenos sanitarios, entre otros. La emisión de bioaerosoles en rellenos sanitarios representa un riesgo potencial para la salud de los trabajadores, la cual debe ser controlada. En Colombia, no se han establecido normativas ambientales que regulen el control de bioaerosoles, ya que existen escasos estudios técnicos relacionados con dichas partículas. En la presente investigación, se evaluó la concentración de bioaerosoles desde un relleno sanitario ubicado en el departamento del Atlántico, en Colombia. Para esto, se realizaron 6 campañas de monitoreo distribuidas en 4 puntos dentro de las diversas etapas de tratamiento (celda activa: 1, piscinas de lixiviados: 1 y celdas pasivas: 2). Se utilizó un impactador de cascada de 6 etapas operando a 28,3 l/min por 5 min y ubicado a 1,5 m de altura con dos medios de cultivo: Agar Plate Count para bacterias y Agar Sabouraud para hongos. También se recopilaron las condiciones meteorológicas durante las campañas de muestreo con la ayuda de un anemómetro KESTREL 4500. El promedio geométrico máximo registrado de aerobacterias fue de 850.18 UFC/m³ durante la jornada de la tarde en la celda activa, mientras que para los aerosoles fúngicos se presentó en la jornada de la mañana en la estación ubicada entre las piscinas de lixiviados, con una concentración de 382.09 UFC/m³. Las correlaciones obtenidas muestran que para los aerosoles fúngicos en la jornada de la mañana la temperatura tiene una incidencia indirecta (-0.29) mientras que la humedad relativa una relación directa (0.24); para la concentración de aerobacterias se presentó una correlación directa en la misma jornada con la temperatura (0.33). De acuerdo al ANOVA jerarquizado la estación estadísticamente significativa para las concentraciones de aerobacterias fue la celda activa, aunque para los aerosoles fúngicos fueron las piscinas de lixiviados. Además, se reportaron altas concentraciones de bioaerosoles respirables resultando perjudiciales a la salud por el tamaño que les permite viajar rápidamente por acción del viento, ser inhalados y llegar a los alvéolos pulmonares y bronquios, afectando principalmente al personal que labora en el relleno sanitario.

Palabras claves

Aerobacterias, aerosoles fungí, bioaerosoles, relleno sanitario, etapas de tratamiento.

Abstract

Bioaerosols are particles of biological origin that can be generated and dispersed by various sources at high concentrations, such as sewage treatment plants, landfills, among others. The emission of bioaerosols in landfills poses a potential risk to workers' health, which must be controlled. In Colombia, they have not established environmental regulations governing the control of bioaerosols, since there are few technical studies related to these particles. In the present investigation, the concentration of bioaerosols was evaluated from a landfill located in the department of Atlántico, Colombia. To this, 6 monitoring campaigns in 4 points within the various treatment stages (active cell: 1, leachate pools: 1 and passive cells: 2) were performed. A six-stage cascade impactor operating at 28.3 L/min for 5 min and located at 1.5 m high with two culture media, Plate Count Agar for bacteria and Sabouraud for fungi, was used. Weather conditions were also collected during sampling campaigns with the help of an anemometer KESTREL 4500. The maximum geometric average registered for aerobacterias was 850.18 CFU/m³ during the afternoon in the active cell, while for fungal aerosols was presented in the morning at the station located between the leachate pools, with a concentration of 382.09 CFU/m³. The correlations obtained show that for fungal aerosols in the morning the temperature has an indirect correlation (-0.29) while the relative humidity has a direct correlation (0.24); for the concentration of aerobacterias a direct correlation on the same period with temperature (0.33) was presented. According to ANOVA hierarchical, the statistically significant stage for aerobacterias concentrations was the active cell, although for fungal aerosols was leachate pools. In addition, high concentrations of respirable bioaerosols harmful to health resulting from the size that allows them to travel quickly by wind, inhaled and reach the pulmonary alveoli and bronchi, mainly affecting the personnel working at the landfill were reported.

Keywords

Aerobacterias, fungal aerosols, bioaerosols, landfill, treatment stages.

Tabla de contenido

1. Introducción.....	16
2. Planteamiento y justificación del problema	18
3. Objetivos.....	22
3.1 Objetivo general	22
3.2 Objetivos específicos.....	22
4. Antecedentes	23
5. Marco teórico	26
5.1 Aerobacterias	29
5.2 Hongos.....	30
5.3 Relación de los bioaerosoles con la atmósfera	31
5.3.1 Condiciones ambientales que afectan la viabilidad de los bioaerosoles	33
6. Metodología.....	37
6.1 Área de estudio	37
6.1.1 Localización	37
6.1.2 Condiciones climatológicas	38
6.2 Muestreo en el área de estudio	39
6.3 Toma de muestras	41
6.4 Análisis de las muestras	42
6.4.1 Cuantificación e identificación del material	42
6.4.2 Determinación de la concentración	43
6.4.3 Análisis e interpretación de los resultados	43
7. Resultados	45
7.1 Concentración de los bioaerosoles	45
7.2 Identificación de los bioaerosoles	49
7.3 Distribución espacio-temporal de los bioaerosoles	51
7.4 Análisis de las variables meteorológicas	54
7.5 Análisis estadístico	55
7.5.1 ANOVA jerarquizado	55

7.5.2	Análisis de correlación de Spearman	58
8.	Discusión de los resultados	59
8.1	Concentración de los bioaerosoles	59
8.2	Clasificación de los bioaerosoles	60
8.3	Distribución espacio-temporal de la concentración de bioaerosoles.....	61
9.	Conclusiones.....	62
10.	Recomendaciones	64
11.	Bibliografía	65
12.	Anexos	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 5-1: Rango de tamaños de bioaerosoles	26
Figura 6-1: Área de estudio	37
Figura 6-2: Variables meteorológicas en el departamento del Atlántico (año 2015).	39
Figura 6-3: Ubicación de estaciones en el relleno sanitario	32
Figura 6-4: Impactador de cascada de seis etapas como simulador del sistema respiratorio del ser humano	34
Figura 7-1: Porcentajes de la concentración de bioaerosoles (aerobacterias y aerosoles fungí)	46
Figura 7-2: Distribución en porcentaje por tipo de microorganismo.....	47
Figura 7-3: Distribución de la concentración de bioaerosoles por etapas del impactador ..	48
Figura 7-4: Especie perteneciente a la morfología de estreptobacilos	49
Figura 7-5: Especie perteneciente al género <i>Aspergillus</i>	50
Figura 7-6: Distribución espacio-temporal de aerobacterias en las jornadas de la mañana y tarde.....	52
Figura 7-7: Distribución espacio-temporal de aerosoles fungí en las jornadas de la mañana y tarde.....	53
Figura 7-8: ANOVA jerarquizado para aerobacterias por estación.....	56
Figura 7-9: ANOVA jerarquizado para aerobacterias por jornada y estación.....	56
Figura 7-10: ANOVA jerarquizado para aerosoles fúngicos por estación	57
Figura 8-11: ANOVA jerarquizado para aerosoles fúngicos por jornada y estación	58

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 5-1: Estimación de las emisiones globales de partículas primarias de bioaerosoles	32
Tabla 6-1: Coordenadas de las estaciones (S) de muestreo	39
Tabla 7-1: Concentración (UFC/m ³) de bioaerosoles en el relleno sanitario	45
Tabla 7-2: Clasificación de aerobacterias según su morfología	49
Tabla 7-3: Clasificación de hongos según su género	49
Tabla 7-4: Variables meteorológicas de las distintas campañas de monitoreo	54
Tabla 7-5: Correlación entre la concentración de bioaerosoles y las variables meteorológicas	58

Glosario

Aerosoles: Son partículas líquidas o sólidas suspendidas en un medio gaseoso con rangos de tamaño desde 0,001 hasta 100 μm .

Bioaerosoles: Partículas de tamaño microscópico suspendidas en el aire y de origen biológico, que pueden afectar a los seres humanos causándoles algún tipo de alergia, toxicidad o infección.

Celda activa: Es establecida en una las etapas de tratamiento de los rellenos sanitarios, es la zona donde se están depositando actualmente los residuos que ingresan al relleno sanitario (disposición diaria de los residuos sólidos).

Celda pasiva: Es establecida en una las etapas de tratamiento de los rellenos sanitarios, es la zona donde ya se ha clausurado temporal o definitivamente una celda destinada a la deposición de los residuos, y se monitorea el proceso de descomposición en la etapa de estabilización.

Colonias: Una colonia es una agrupación de bacterias/hongos formada a partir de la reproducción de una Unidad Formadora de Colonia (UFC) sobre un medio sólido; aunque varía de tamaño generalmente es visible a simple vista.

Contaminantes: Fenómenos físicos o sustancias, o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

Esterilización: Es el proceso por el cual se obtiene un producto libre de microorganismos viables.

Etapas de tratamiento: Hace referencia a cada una de las etapas de tratamiento que reciben los residuos en el proceso de gestión integral desarrollado en el relleno sanitario.

Fuente de emisión: Es toda actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

Impactador de cascada: Es un equipo empleado para la medición de la concentración y distribución de tamaños de partículas en el aire.

Monitoreo: Proceso que consiste en una serie de actividades que apuntan a medir el cambio en los recursos de manera consistente.

Piscinas de lixiviados: Es una de las etapas de la gestión integral de residuos, estas están destinadas para el almacenamiento y/o tratamiento del lixiviado generado por los residuos sólidos.

Relleno sanitario: Lugar destinado a la disposición final de desechos o residuos sólidos.

Residuos sólidos: Es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula.

Riesgo biológico: son los agentes y materiales potencialmente transmisibles para los humanos, animales y otras formas de vida. Ellos incluyen patógenos conocidos y agentes infecciosos como: Bacterias, plásmidos, virus, hongos, micoplasmas y parásitos, productos celulares, productos de animales y animales de laboratorio e insectos que pueden ser reservorios de agentes infecciosos y fluidos corporales

Unidades formadoras de Colonias (UFC): Una UFC puede ser un solo microorganismo o bien un grupo de microorganismos de una misma especie como en el caso de bacterias que tienen tendencia a permanecer unidas.

1. Introducción

Los bioaerosoles son partículas suspendidas en el aire de origen biológico (Walser et al., 2015) que varían en tamaño y composición (Ghosh et al., 2015); incluyen virus, bacterias, hongos y sus esporas, fragmentos de líquenes, protistas, fragmentos de plantas, polen, pequeñas semillas, invertebrados y sus fragmentos, así como material fecal (Kobayashi et al., 2015). Según Hurtado et al. (2014) los microorganismos presentes en los bioaerosoles tienen gran importancia ambiental por su influencia en los procesos físicos naturales como la nucleación, el clima global y el ciclo hidrológico. No obstante, los bioaerosoles pueden ser considerados un riesgo potencial para el hombre por la propia patogenicidad e inclusive cuando estos encuentran una vía de entrada al organismo (Sánchez-Monedero et al., 2007; Bierman, 2013).

Algunos estudios reportan la presencia de bioaerosoles, específicamente bacterias mesófilas y hongos, en diferentes actividades antropogénicas asociadas a la descomposición de material orgánico (Guo et al., 2014; Bünger et al., 2007) siendo los sistemas de tratamiento de residuos sólidos (Sánchez-Monedero et al., 2006) son una fuente potencial para la emisión de bioaerosoles (Kummer & Thiel, 2008), ya que los microorganismos se encuentran asociados a la degradación de los residuos orgánicos (Rodríguez et al., 2005; Flores et al., 2007; Vélez-Pereira et al., 2010).

En las plantas de tratamiento de aguas residuales se reportan valores de 3021 UFC/m³ para las bacterias y 926 UFC/m³ para hongos (Guo et al., 2014). En plantas de compostaje se obtuvieron valores de concentraciones equivalentes a 4–3500×10³ UFC/m³ para bacterias y 2–11,000×10³ UFC/m³ para hongos y (Bünger et al., 2007). Schlosser et al. (2015) reportaron 1800 UFC/m³ para las bacterias y 13.000 UFC/m³ para los hongos y en una planta de clasificación de envases plásticos, mientras que en rellenos sanitarios Schlosser et al. (2016) reportó una concentración máxima de 480.000 UFC/m³ para mohos mesófilos y 9300 UFC/m³ para *Aspergillus fumigatus*.

Por sus características los bioaerosoles pueden ser dispersados con el movimiento del aire, que representa el mejor camino de dispersión (Mosso et al., 2002), aumentando las posibilidades de ocurrencia de infecciones, alergias o enfermedades respiratorias causadas por estos agentes (Walser et al., 2015). Por lo anterior, los trabajadores de la planta de disposición de residuos sólidos presentan un alto riesgo biológico asociado a la inhalación de bioaerosoles (Sánchez-Monedero et al., 2006), llegando a presentar según diversas investigaciones problemas de salud con asma y rinitis (Yao & Mainelis, 2007), neumonitis por hipersensibilidad (Bierman, 2013) y muchos otros problemas de salud, incluyendo infecciones (Arenas, 2011).

La presente investigación evaluó el comportamiento de los bioaerosoles en un relleno sanitario del departamento del Atlántico, para ello se cuantificó, identifico y analizo las concentraciones de aerobacterias y aerosoles fungí generados en las distintas etapas de gestión integral de los residuos sólidos, en especial en las operaciones que impliquen agitación o movimiento del material orgánico. El análisis presentado esta en función de la variación espacio temporal de las concentraciones reportadas a lo largo de 6 campañas de muestreos, y soportadas en un análisis de varianza y correlación que permitan interpretar las isoconcentraciones presentadas en el área del relleno.

2. Planteamiento y justificación del problema

La contaminación del aire se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la salud pública en muchas ciudades de América Latina y el Caribe (Arciniegas et al., 2006). Según CEPIS (2005), para América Latina y el Caribe, 35.000 muertes se atribuyen a la contaminación del aire cada año, pero la cifra real es posible que sea más alta. En Colombia son aproximadamente 7400 nuevos casos de bronquitis crónica y 13000 hospitalizaciones por causa de enfermedad respiratoria crónica (Tyler et al, 2013).

Existen gran variedad de sustancias en el aire causadas por emisiones antropogénicas y que pueden generar inconvenientes de contaminación, como lo son el dióxido de sulfuro (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), material particulado (PM) (Rodríguez et al, 2011), bioaerosoles, entre otros. Sin embargo los bioaerosoles definidos como partículas que se encuentran suspendidas en el aire que contienen organismos viables y no viables (Vélez-Pereira et al, 2010) tienen especial interés desde el punto de salud pública por generar IRAs, alergias, dermatitis en la población (Yao & Mainelis, 2007). Los estudios de salud ambiental mostraron que los efectos a la exposición a bioaerosoles pueden ser agravados por sus altas concentración cercanas a las fuentes emisoras (Bierman, 2013; Hurtado et al., 2014; Ghosh et al., 2015).

Las principales actividades generadoras de bioaerosoles van asociadas a centros de tratamiento de residuos orgánicos y plantas de compostaje (Pankhurst et al., 2011), plantas de selección de residuos de envases (Solans et al., 2007), estaciones depuradoras de aguas residuales (Sánchez-Monedero et al., 2007), así como en vertederos o rellenos sanitarios; este último es uno de las fuentes de mayor proliferación de bioaerosoles, (Vélez-Pereira & Camargo, 2009), algunos de los cuales son patógenos, denotando importancia a las bacterias mesoaerobias y los hongos. Estos aerosoles pueden ser liberados especialmente en las operaciones del relleno que impliquen agitación o movimiento del material, como por ejemplo, el transporte y descarga de los residuos, su trituración, el volteo de las pilas de

compostaje y por último, el cribado del compost maduro originan la liberación de microorganismos al aire (Sánchez-Monedero et al., 2006).

Según el estudio realizado por Rodríguez et al, 2005 sobre la dispersión de aerotransportables en rellenos sanitarios, de las once especies bacterias identificadas en el laboratorio, predomina el *Bacillus micoides*. Así mismo Roodbari et al., 2013 identificaron que el género de hongo predominante fue el *Cladosporium*, seguido del *Aspergillus* en la misma área de estudio. Las especies mencionadas son consideradas como de riesgo a la salud dada la cronicidad o gravedad de las enfermedades que se pueden desarrollar por la respiración de dichos organismos (Rodríguez et al, 2005).

Las principales vías de exposición y de entrada en el organismo humano de los agentes patógenos son el contacto con la piel, causando enfermedades como brucelosis y carbunco; la penetración a través de heridas y microfisuras causando tétanos, Pasteurellosis y Erisipela; y por medio de la inhalación (Mirón, 2011); siendo la última la que da lugar a los mayores problemas para la salud debido a que la acumulación de las partículas en los pulmones, bronquios y alvéolos puede provocar diversas enfermedades alérgicas, respiratorias crónicas e infecciosas graves (Stetzenbach, 2002; Rodríguez et al., 2005; Sánchez-Monedero et al., 2006; Vélez-Pereira et al., 2010, Arenas, 2011).

Dado que la inhalación resulta ser la principal vía de exposición a los bioaerosoles y de mayor riesgo para el ser humano, se torna imprescindible comprender la distribución de los distintos rangos de tamaños de estas partículas, la cual es una característica que determinará hasta qué punto del sistema respiratorio humano pueden depositarse (Każmierczuk & Bojanowicz-Bablok, 2014; Ghosh et al., 2015). Según la investigación realizada por Carmargo et al, 2011, en la que utilizan un Impactador de Cascada de 2 etapas (Etapa 1 y 6), se registra que el mayor número de partículas colectadas pertenecen a la Etapa 6, lo cual significa que la presencia de bioaerosoles respirables resultan perjudiciales a la salud debido a su acumulación en los alveolos.

En la actualidad no existen límites permisibles ni valores límites umbral o por sus siglas en inglés Threshold Limit Values (TLVs) (Srikanth et al., 2008), que regulen la exposición a

bioaerosoles en lugares de trabajo, por tanto es difícil establecer control sobre los riesgos que suponen para los trabajadores, debido a diversos motivos, tales como la complejidad de los componentes de los bioaerosoles (bacterias, hongos, restos de microorganismos, su viabilidad, sustancias excretadas por ellos, etc.), la falta de información sobre la dosis infectiva de muchos de los agentes biológicos y la distinta respuesta de los individuos a un mismo agente biológico (INSHT, 1996). No obstante mediante diferentes guías técnicas se han propuesto límites permisibles a la exposición de bioaerosoles; los países escandinavos proponen una concentración máxima de 10.000 UFC/m³ para bacterias totales y 1.000 UFC/m³ para bacterias Gram-negativas, durante 8 horas de exposición (Malmros, 1990; Poulsen et al., 1995), lo cual es reiterado por medio de la guía del instituto IRSST (Goyer et al., 2001).

Cabe destacar que los bioaerosoles han sido poco controlados por las autoridades ambientales a nivel nacional, la guía ambiental de rellenos sanitarios (Ministerio del Medio Ambiente, 2002) establece realizar monitoreos con frecuencia, sin embargo no existe normatividad que regule límites permisibles de bioaerosoles en rellenos sanitarios u otros ambientes (plantas de tratamiento de agua residual, plantas de compostaje, entre otros), por tanto este proyecto generará información técnica sobre el comportamiento de los bioaerosoles generados por fuentes antropogénicas en las condiciones locales, suministrando herramientas para la toma de decisiones pertinentes por parte de los administradores del sistema de disposición final de residuos sólidos objeto de estudio y a su vez por las autoridades ambientales competentes.

En Colombia, según un diagnóstico realizado en el año 2011 del Sistema Único de información (SUI), la cantidad de toneladas dispuestas por 1.098 municipios del territorio nacional genera un promedio diario de 26.537 toneladas de residuos sólidos, un 8% más con relación a lo generado en el año 2010, que corresponde a 24.603 Ton/día. Por su parte el departamento del Atlántico se encuentra dentro del grupo que mayor dispone residuos entre 1.000 - 7.500 toneladas (Santos et al., 2011)

Lo anterior representa un riesgo potencial a la salud ocupacional de los operarios de la planta y de salud pública para las comunidades en el área de influencia como consecuencia a la inhalación de estos bioaerosoles (Izzeddin et al., 2011; Vélez-Pereira et al., 2014).

En este sentido, evaluar las concentraciones generadas en las distintas etapas de operación, identificando su comportamiento en las condiciones climáticas locales y su distribución espacio temporal, permitirá establecer un acercamiento sobre el posible riesgo biológico en las actividades del relleno, por ello se ha planteado la siguiente pregunta problema: ¿Cómo influyen las etapas de un sistema de disposición final de residuos sólidos en el departamento del Atlántico en las concentraciones atmosféricas de bioaerosoles?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la concentración de bioaerosoles en las diferentes etapas de un sistema de disposición final de residuos sólidos municipales.

3.2 Objetivos específicos

Cuantificar la concentración de bioaerosoles emitidos desde las diversas etapas de tratamiento de un relleno sanitario.

Identificar los tipos de microorganismos presentes en los bioaerosoles del relleno sanitario estudiado.

Establecer la distribución espacio-temporal de los bioaerosoles del relleno sanitario.

4. Antecedentes

A nivel internacional, diversos estudios han analizado el comportamiento de los bioaerosoles y su concentración en distintos ambientes, tales como plantas de tratamiento de aguas residuales (Ranalli et al., 2000; Bauer et al., 2002; Pascual et al., 2003; Karra & Katsivela, 2007; Korzeniewska et al., 2009; Stellacci et al., 2010; Guo et al., 2014), instalaciones de compostaje (Sykes et al., 2007; Taha et al., 2007; Tamer Vestlund et al., 2014), áreas urbanas (Valsan et al., 2015; Uk Lee et al., 2016; Wei et al., 2016), rellenos sanitarios (Huang et al., 2002; Rodríguez et al., 2005; Vélez-Pereira & Camargo, 2009; Breza-Boruta, 2012; Kaźmierczuk & Bojanowicz-Bablok, 2014; Schlosser et al., 2016), entre otros.

En plantas de tratamiento de aguas residuales se han reportado concentraciones de aerobacterias desde 450 hasta 17000 UCF/m³, mientras que para aerosoles fungí entre 140 y 1700 UCF/m³ (Bauer et al., 2002; Li et al., 2011; Guo et al. 2014; Li et al., 2015). Teniendo en cuenta los resultados, se evidencia muestran predominancia de las aerobacterias sobre los aerosoles fúngicos debido a que las bacterias son predominantes en los procesos biológicos de tratamiento de las aguas residuales. No obstante en plantas de compostaje al aire libre las diferencias no son tan altas, ya que se han reportado concentraciones de aerobacterias de hasta 10⁶ UFC/m³ para aerobacterias, mientras que los aerosoles fungí reportan concentraciones de 10⁴ UFC/m³ (Byeon et al., 2008; Grisoli et al., 2009; Pankhurst et al., 2011).

A nivel internacional, estudios de bioaerosoles en rellenos sanitarios arrojaron valores de bacterias y hongos viables por encima de 10³ UFC/m³ reportar valores hasta de 68312 UFC/m³, lo cual indica que existe un posible riesgo debido a este tipo de fuente emisora (Huang et al., 2002; Rodríguez et al., 2005; Heo et al., 2010; Schlosser et al.; 2016). Dentro de estos valores se resalta el hecho que el *Aspergillus Fumigatus* se ha reportado como predominante en las emisiones con valores hasta de 9300 UFC/m³ Schlosser et al. (2016) registró un promedio geométrico, para la concentración de mohos mesofílicos en época

seca, de 13000 UFC/m³ en un relleno sanitario de Francia e inclusive para el caso de *Aspergillus fumigatus* obtuvo un valor máximo de 9300 UFC/m³. En adición, en una investigación realizada en México, se llegó a reportar valores de bioaerosoles de hasta 68312 UFC/m³, lo cual indica que existe un posible riesgo debido a este tipo de fuente emisora (Rodríguez et al., 2005). Las especies mencionadas son consideradas como de riesgo a la salud dada la cronicidad o gravedad de las enfermedades que se pueden desarrollar por la respiración de dichos organismos (Rodríguez et al, 2005).

Estas concentraciones resultar ser bastante altas, tal y como ha sido comprobado por Heo et al. (2010) al comparar las aerobacterias en un relleno sanitario y un campo de maíz, siendo las primeras 6 veces mayores que la segunda fuente de estudio. Sin embargo, hay afirmaciones que plantean que las concentraciones de bioaerosoles en rellenos sanitarios, en especial la de hongos, se pueden ver afectadas la abundante vegetación de las áreas circundantes y pueden ser fuentes considerables en la emisión de bioaerosoles. Esto se evidencia en el estudio de Frączek et al. (2014), quienes determinaron las concentraciones de bioaerosoles en 10 estaciones, ubicadas estratégicamente en un relleno sanitario de Polonia, entre las cuales se toman como puntos clave la celda activa, las celdas pasivas, piscinas de lixiviados, área urbana alejada del relleno sanitario, área circundante con abundante vegetación, etc. Los resultados obtenidos por dicha investigación indican que las etapas de tratamiento con mayores concentraciones registradas son la celda activa y una celda pasiva ubicada de manera contigua a la activa, mientras que los reportes más bajos se presentaron en la estación localizada en el área urbana alejada del relleno sanitario. Así mismo, Kaźmierczuk & Bojanowicz-Bablok (2014) obteniendo que a medida que aumenta la distancia con respecto al relleno sanitario disminuye la concentración de los bioaerosoles con valores en el relleno de 850 UFC/m³ y de 30 UFC/m³ a 800m del relleno.

En Colombia, las investigaciones relacionadas con bioaerosoles en rellenos sanitarios han sido escasas. Entre los referentes más recientes se encuentra el publicado por Vélez-Pereira et al. (2009), sobre la “Evaluación de la concentración de bioaerosoles fungí asociados al relleno sanitario Palangana en Santa Marta”. En este, la máxima concentración reportada fue del orden de 3×10^3 UFC/m³, además se reportó alta concentración de hongos respirables

resultando perjudiciales a la salud por el tamaño que les permite viajar rápidamente por acción del viento, ser inhalados y llegar a los alvéolos pulmonares, afectando principalmente al personal que labora en el relleno sanitario. En otro referente nacional, se llevó a cabo la evaluación de bacterias mesófilas y hongos en el relleno sanitario La Pradera, reportando un valor promedio para hongos de hasta 1728 UFC/m³ y bacterias mesófilas con concentración máxima promedio de 1545 UFC/m³; sin embargo, en este último no se realiza una discriminación de las concentraciones por diámetro de las partículas, debido a que se empleó un impactador de cascada de tan sólo una etapa (Lenis et al., 2013).

5. Marco teórico

Entre los contaminantes atmosféricos se encuentran los bioaerosoles, los cuales son partículas biológicas con rangos de tamaño desde 0,01 hasta 100 μm (ver Figura 5-1) (Stetzenbach, 2004; Pepper & Dowd, 2009; Achanzar & Mangipudy, 2014), que contienen microorganismos (bacterias, hongos o virus) o compuestos orgánicos derivados de microorganismos (endotoxinas, metabolitos, toxinas microbianas y otros fragmentos), de tamaño microscópico suspendidas en el aire que pueden afectar a los seres humanos causándoles algún tipo de alergia, toxicidad o infección (Sánchez-Monedero et al., 2006; Mandal & Brandl, 2011); son ubicuos, altamente variables, complejos, de origen natural o antropogénico (Eduard et al., 2008; Srikanth et al., 2008).

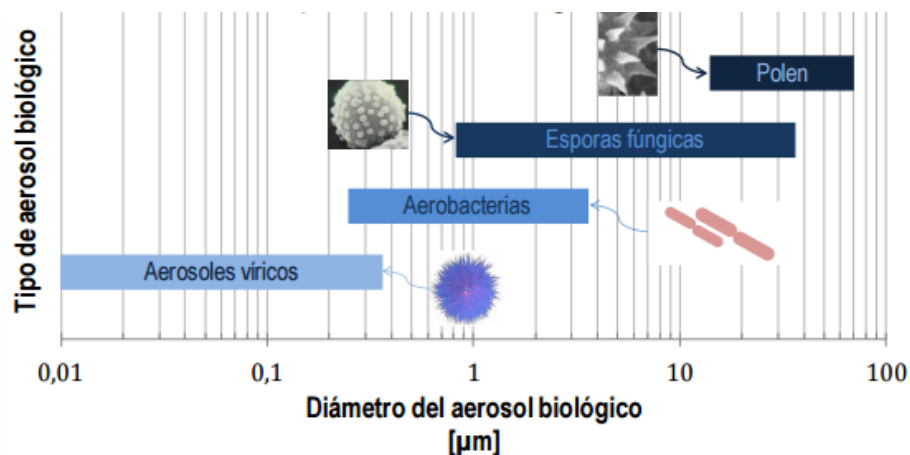


Figura 5-1: Rango de tamaños de bioaerosoles.

Fuente: Vélez-Pereira (2011)

Los bioaerosoles forman una parte importante de los aerosoles atmosféricos, a veces llegando a cerca del 50% numérico de todas las partículas de aerosol (Mandal & Brandl, 2011). Se encuentran suspendidas en un medio gaseoso por un periodo de tiempo variable en función del tamaño y composición de la partícula, así como de la fuente, mecanismos de formación del aerosol y de las condiciones del medio ambiente que prevalecen. Debido a su poco peso, las partículas en suspensión son fácilmente transportadas, transferidas y desplazadas de un ambiente a otro (Mandal & Brandl, 2011).

Algunos autores manifiestan que la atmósfera no posee microorganismos nativos, sino que representan las poblaciones alóctonas transportados desde los hábitats acuáticos y terrestres hacia la atmósfera. Los microbios del aire dentro de 91,4 -304,8 metros o más de la superficie de la tierra, son los organismos del suelo que se han adherido a fragmentos de hojas secas, paja o partículas de polvo, siendo arrastrados por el viento, mientras que a distancias inferiores de 152,4 metros se encuentran esporas de *Bacillus* y *Clostridium*, ascosporas de levaduras, fragmentos de micelio y esporas de mohos y Streptomycetaceae, polen, quistes protozoarios, algas, *Micrococcus*, *Corynebacterium*, entre otros. Las especies varían considerablemente en su sensibilidad a un valor dado de exposiciones de humedad relativa, temperatura y radiación, presentando una mayor presencia en las masas de aire sobre las superficies de tierra que sobre el mar (Sharma, 2007).

Las fuentes de emisión que generan mayores concentraciones de bioaerosoles son las plantas de tratamiento de aguas residuales (Pascual et al., 2003), instalaciones de compostaje (Tamer Vestlund et al., 2014), áreas urbanas (Valsan et al., 2015), plantas de reciclaje de plástico (Schlosser et al, 2015) y rellenos sanitarios (Schlosser et al, 2016). Estos últimos representan una fuente de colonización y emisión de bioaerosoles (Rodríguez et al., 2005), ya que los materiales de desecho presentes en los vertederos contienen microorganismos a partir de residuos biodegradables, los cuales son favorecidos por la humedad y la temperatura (Miller & Clesceri, 2002).

Así mismo, las condiciones meteorológicas favorecen el aumento en las concentraciones de bioaerosoles, tal como lo comprueba Heo et al. (2014), en su investigación desarrollada en Korea del Sur. En dicho estudio, se ubicaron estaciones de monitoreo en los siguientes lugares: área urbana (outdoor e indoor), bosque y lago. Los monitoreos fueron realizados durante periodos con lluvia y sin precipitación, de los cuales se concluyó que durante la lluvia las concentraciones tanto de aerobacterias como de aerosoles fúngicos fueron mayores, siendo este último el predominante, y la estación que llegó a reportar 7 veces más durante la lluvia que sin lluvia fue en el área urbana (outdoor).

Los aumentos en las concentraciones de bioaerosoles durante eventos de lluvia pueden explicarse debido a que estos se encuentran suspendidos en el aire a grandes altitudes actuando como núcleos de condensación, lo que permite que desciendan hacia la superficie de la tierra (Sattler et al., 2001). Otro argumento a favor, es la disminución de los rayos ultravioleta (UV) y el aumento en la humedad relativa, los cuales son factores que afectan la viabilidad de dichos microorganismos (Hwang et al., 2010).

En este sentido, otros estudios han permitido evaluar factores diferentes que afecten la variabilidad en las concentraciones de los bioaerosoles, como es el caso de las estaciones del año y la distancia con respecto a la fuente emisora; tal es el caso del estudio desarrollado por Malecka-Adamowicz et al. (2007), quienes realizaron un estudio de bioaerosoles en un relleno sanitario ubicado en Polonia, seleccionando distintas estaciones con respecto a la dirección del viento, es decir, una a barlovento y cuatro a sotavento, estas últimas a 0 m, 100 m, 200 m y 300 m con respecto al relleno sanitario. De este modo, determinando que las concentraciones disminuyen a medida que hay un incremento en la distancia con respecto a la fuente de emisión. Por otra parte, Kalwasińska & Burkowska (2013), evaluaron la concentración de bioaerosoles en un relleno sanitario clausurado y uno activo, en distintas épocas del año; de esta manera, se reportaron altas concentraciones de bioaerosoles patógenos en el relleno sanitario activo, mientras que las épocas del año más influyentes en el aumento de las concentraciones fueron primavera y verano.

Si bien es cierto que gran variedad de factores pueden afectar las concentraciones de bioaerosoles en sistemas de disposición final o rellenos sanitarios, uno de los principales corresponde a las etapas de tratamiento del sistema de disposición final de residuos sólidos. Por lo anterior, se han analizado las concentraciones de dichos microorganismos en diferentes etapas de estos sistemas, encontrando que la etapa de mayor influencia suele ser la celda activa de operación, en la cual existe mayor movimiento del material orgánico (Frączek et al., 2014).

5.1 Aerobacterias

Las bacterias constituyen uno de los grupos más abundantes en el ambiente. En condiciones naturales se les encuentra en el suelo, el agua, y las plantas, principalmente como organismos saprobios (Camargo et al., 2011). Las bacterias suspendidas en la atmósfera reciben el nombre de aerobacterias o aerosoles bacterianos, debido a que carecen de mecanismos activos de liberación, son introducidas a la atmósfera por procesos mecánicos, directamente por la acción del viento y la lluvia sobre el suelo, los cuerpos de agua y la superficie de las hojas, e indirectamente por la acción de las olas y la formación de burbujas sobre los sistemas acuáticos (Camargo et al., 2011).

Las bacterias, al igual que los hongos, virus y demás bioaerosoles, presentes en la atmósfera, se originan a partir de fuentes naturales y antropogénicas, tales como plantas, animales, suelos, cuerpos de agua, plantas de vertido de residuos, plantas de tratamiento de aguas residuales y actividades agrícolas. Muchas actividades humanas tales como los residuos sólidos y el transporte de aguas residuales, el tratamiento y ambiente húmedo propicio pueden aumentar la cantidad de bacterias y otros bioaerosoles en el aire cultivables en un entorno urbano (Gangamma, 2014).

De todas las especies de bacterias conocidas sólo algunas son patógenas para el ser humano, las cuales pueden generar enfermedades que han sido identificadas y son transmitidas por el aire, afectando al organismo dependiendo de su vía de exposición (respiratoria y cutánea). Entre las enfermedades respiratorias se pueden citar: enfermedad de los legionarios, fiebre de Pontiac, neumonía por *Mycobacterium avium*-M. Intracellulare, tos ferina, infecciones por estreptococos A inferiores, neumonía estreptocócica y tuberculosis. Mientras que las cutáneas se enuncian la difteria, síndrome del shock tóxico, celulitis y erisipela, enfermedades postestreptocócicas y escarlatina (Prescott et al., 2004).

En adición, las bacterias pueden generar afectaciones al ser humano por medio de ciertos componentes metabólicos denominados como endotoxinas, las cuales son una familia de

glicolípidos superficiales de bacterias Gram negativas que son ubicuas en el ambiente (Dutil et al., 2009). Estas son regularmente encontradas en ambientes indoor y outdoor, agua, suelo y comida. Para los seres humanos, la exposición a endotoxinas ocurre sobre una base diaria de bacterias infecciosas y no infecciosas en ambos ambientes, tanto ocupacionales como no ocupacionales (Hurst et al., 2007).

5.2 Hongos

Los hongos son organismos eucariontes que constituyen un complejo grupo, tan grande que se calculan alrededor de 200.000 especies, pero se cree que hay más de un millón y medio; incluyen mohos, levaduras, royas, entre otros. Viven en los medios más variados, y sólo alrededor de 400 son necesariamente patógenos para mamíferos, así como para plantas, insectos (entomógenos) o de otros hongos (microparásitos), y mientras que unos pocos cientos son hongos oportunistas (Arenas, 2011).

Los aerosoles fungí se pueden encontrar en el aire (Fang et al., 2005). La concentración de dichos microorganismos puede variar de un lugar a otro, basado en las variables ambientales del lugar, substratos de crecimiento fúngico, y las fuentes de emisión (Adhikari et al., 2004). Constituyen el componente principal de los aerosoles biológicos debido a su buena adaptación al transporte aéreo (Lee et al., 2006). Este tipo de bioaerosoles se encuentran en el rango de tamaño desde 1 hasta 50 micras, pero típicamente entre 2 y 10 micras (Elbert et al., 2007). Normalmente son multicelulares ya que cuentan con filamentos tubulares llamados hifas que a su vez cuenta con una red llamada micelio el cual es el encargado de la reproducción de esporas. Estas esporas pueden ser liberadas por procesos pasivos, utilizando el viento u otras fuerzas externas, o por procesos activos donde una expulsión se puede producir por presión osmótica o la tensión superficial (Löndahl, 2014).

Varios estudios han informado que los bioaerosoles fúngicos son relevantes para la aparición de enfermedades y los problemas de salud pública asociados con efectos tóxicos agudos, las alergias y el asma, daño subyacente de pulmón, y enfermedades en las vías respiratorias inferiores (Denning et al., 2014; Baxi et al., 2016; Pham & Lee, 2016).

Las infecciones causadas por hongos microscópicos se llaman micosis, y toman su nombre de la parte del organismo que invaden o del hongo que las causa (Arenas, 2011). Las micosis pueden clasificarse en función del tejido infectado en micosis superficiales, subcutáneas y sistémicas (Vilata, 2006; Prats, 2006; Murray et al., 2009). Entre las micosis superficiales se han reportado las siguientes: pitiriasis versicolor, la piedra blanca y negra, la tiña negra, dermatofitosis o tiñas, las candidosis superficiales e infecciones superficiales por hongos filamentosos no dermatofitos (Vilata, 2006). En cuanto a las micosis subcutáneas: esporotricosis, micetoma y cromoblastomicosis. Por último, algunas de las micosis sistémicas son: criptococosis, aspergilosis, candidosis, peniciliosis, tricosporonosis y zigomicosis (Vilata, 2006).

5.3 Relación de los bioaerosoles con la atmósfera

La atmósfera presenta clima inhospitable para los microorganismos, principalmente debido al estrés por desecación, por lo cual sólo cuentan con un lapso de tiempo limitado para permanecer biológicamente activos (Pepper & Gerba, 2015); sin embargo, en la atmósfera existe la presencia de gases como el nitrógeno y oxígeno, que le permite a un gran variedad de organismos utilizarla como su medio de transporte (Camargo et al., 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, los bioaerosoles están siempre presentes en la atmósfera, aunque su número y viabilidad varíen con las condiciones propias de la localidad (Rosas et al., 2004; Camargo et al., 2011).

La mayoría de los microorganismos que entran a la atmósfera provienen de fuentes naturales como la vegetación, el suelo y los cuerpos de agua por acciones como combustión, erupción de un volcán, tormentas de polvo, lluvias y vientos, y en menor proporción de las actividades antropogénicas (Camargo et al., 2011). Una vez que los microorganismos se encuentran en suspensión en el aire en forma de bioaerosoles, su comportamiento aerodinámico va a estar gobernado por sus propiedades físicas (forma, tamaño y densidad) y las condiciones medioambientales como las corrientes de aire, humedad, temperatura, etc. (Sánchez-Monedero et al., 2006).

El material biológico es uno de los grupos más importantes de aerosoles en la atmósfera, aunque tanto su concentración y el impacto sobre los restos de entorno son poco claras. Se han reportado que hasta 1.000 Tg de aerosoles se emiten cada año (ver Tabla 5-1) en comparación con 3.300 Tg de sal de mar y 2.000 Tg para el polvo mineral (Jonsson, 2014).

Tabla 5-1: *Estimación de las emisiones globales de partículas primarias de bioaerosoles.*

	Emisión global [Tg año⁻¹] mediana (min- max)	Número de concentración	Masa de concentración
Bioaerosol total	132 (<10-1000)		~ 0,1
Bacteria	1.66 (0.7-28)	~ 10 ⁴	~ 10 ⁻³
Partícula viral		~ 10 ⁴	~ 1
Polen	66 (47-84)	~ 10 (up to 10 ³)	~ 0,1-1
Esporas de hongos	31 (8-186)	~ 10 ³ -10 ⁴	~ 10 ⁻³
Algas		~ 100 (up to 10 ³)	
Sal marina	3340		
Polvo mineral	2150		
Combustible fósil	35		

Fuente: Jonsson, 2014.

Entre las propiedades que rigen el comportamiento aerodinámico de las partículas en el aire se encuentra el tamaño. En primer lugar, las partículas de mayor tamaño (con un diámetro aerodinámico superior a 10 µm) tienden rápidamente a sedimentar por la acción de las fuerzas gravitacionales, mientras que las partículas muy pequeñas (inferiores a 0.1 µm) son transportadas por movimientos Brownianos y presentan un comportamiento similar a un gas, permaneciendo así en suspensión. Sin embargo, las partículas con un diámetro aerodinámico entre 0.1 y 10 µm presentan un comportamiento intermedio ya que su movimiento está afectado en mayor o menor medida por ambos tipos de fuerzas (Cox & Whates, 1995; Sánchez-Monedero et al., 2006; Rey & Velasco, 2007).

El movimiento Browniano pone de manifiesto las fluctuaciones estadísticas que ocurren en un sistema en equilibrio térmico; con base en esto se define como movimiento Browniano de los aerosoles, el correspondiente al movimiento de micropartículas en un camino irregular (Cutnell & Johnson, 1995), que plantea que el desplazamiento de la partícula es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su radio (Cox & Wathes, 1995).

Por muy pequeñas que sean las partículas, el movimiento Browniano es un factor importante en la difusión en el aire de las partículas inferiores, ya que éstas interactúan debido a la gravedad, siendo la difusión de las partículas en el aire fuertemente influenciada por las fuerzas Brownianas, dado que su trayectoria en el aire no es una vía recta hacia abajo, sino una dispersión irregular, como resultado del movimiento Browniano (Valenzuela, 1995; Gibney, 2000).

Por otro lado, las fuerzas gravitacionales que modulan el comportamiento de las partículas son dos fuerzas opuestas: la primera corresponde a la sedimentación denominada fuerza gravitacional de sedimentación, resultado de la acción atractiva de la gravedad de la tierra sobre la masa de la partícula, y la segunda se atribuye a la fuerza de empuje del aire, y se atribuye a la viscosidad del fluido del aire (masas de aire). La expresión matemática que describe el comportamiento de las sumatorias de estas dos fuerzas se conoce como la velocidad de sedimentación (Cox & Whates, 1995; Gnanasekharan & Floros, 1995).

5.3.1 Condiciones ambientales que afectan la viabilidad de los bioaerosoles

El destino y el transporte de los microorganismos en el ambiente son temas complicados que involucran muchos factores físicos y bioquímicos (Vélez-Pereira, 2009). El transporte de bioaerosoles se rige principalmente por factores hidrodinámicos y cinéticos, mientras que su viabilidad depende de la composición biológica específica, composición química, y los parámetros meteorológicos a los que están expuestos (Mohr, 2002; Hurst et al., 2007).

La viabilidad en los bioaerosoles es considerada como la capacidad que tienen dichas partículas en bajar su tasa metabólica entrando a un estado de inactivación durante su transporte, después de impactar en un medio con las condiciones óptimas para crecer o infectar, siendo capaces de sobrevivir al estrés ambiental, para así activarse y cumplir con sus funciones viables (Camargo et al, 2011).

La gran mayoría de los microorganismos en el aire son inmediatamente inactivados debido al estrés ambiental (por ejemplo, desecación, temperatura y oxidación) que actúan para

alterar la composición de la superficie exterior (Mohr, 2002). Los factores ambientales más significativos que influyen en la viabilidad son la humedad relativa, radiación solar, temperatura y concentración de oxígeno (Cox, 1987). Influencias adicionales se ejercen a través de iones de aire y factores al aire libre. Algunos microorganismos han incorporado mecanismos que actúan para reparar los daños causados durante las fases de aerosolización y de transporte. Aunque algunas generalidades se pueden hacer en relación con la estabilidad del aerosol o el destino de los microorganismos, las bacterias tienden a comportarse de manera diferente de los virus, que se comportan de manera diferente de los hongos (Mohr, 2002).

❖ **Humedad relativa**

El estado y contenido de agua asociada con los bioaerosoles es un factor fundamental que influye en la viabilidad de estos microorganismos. A medida que disminuye la humedad relativa, también lo hace el agua disponible para el medio ambiente exterior del microorganismo, causando la deshidratación, lo que resulta en la inactivación de muchos microorganismos. De todos los parámetros meteorológicos medibles, la humedad relativa es el más importante con respecto a la estabilidad del aerosol (Cox, 1987).

Israelí et al. 1994 estudiaron los microorganismos liofilizados y mostró la importancia del contenido de agua para la viabilidad de los microorganismos. Llegaron a la conclusión de que la biomembrana, en forma de bicapas de fosfolípidos, se somete a cambios de conformación de una fase cristalina a una fase de gel como resultado de la pérdida de agua. Estas transformaciones inducen cambios a las proteínas celulares, que a su vez resulta en una pérdida de viabilidad. No sólo es el contenido de agua de los microorganismos en aerosol un factor principal que contribuye a la viabilidad del aerosol (Webb, 1959; Webb, 1960; Webb, 1965), pero la humedad relativa de un sistema afecta directamente a la densidad de la unidad de bioaerosoles (Mohr, 2002).

El tamaño, la forma y la densidad de una partícula de aerosol están directamente relacionados con el diámetro aerodinámico que determina la velocidad de sedimentación y la ubicación de deposición en el tracto respiratorio e influye en la eficiencia de la recogida

de muestras de aerosol. Los efectos de la humedad relativa pueden ser influenciados por el contenido del fluido de suspensión utilizado antes de la aerosolización (Barlow, 1972), el contenido del fluido de recogida (Cabelli, 1962), y prehumidificación (Warren et al., 1969).

Para algunos microorganismos, los cambios en la humedad relativa después de la aerosolización tienen un efecto más profundo en la estabilidad del aerosol que la humedad relativa constante (Hatch & Dimmick, 1966).

❖ **Temperatura**

La presión de vapor, y por lo tanto la humedad relativa de un sistema, depende de la temperatura. Esta relación hace que sea muy difícil separar los efectos de la temperatura y de la humedad relativa. Estudios para determinar el efecto de la temperatura sobre la estabilidad del aerosol han demostrado generalmente que los aumentos en la temperatura tienden a disminuir la viabilidad de los microorganismos en el aire. Además, las células congeladas tienden a perder proteínas celulares (permeasa) que dan lugar a tasas de inactivación de aerosol elevadas (Mohr, 2002).

❖ **Oxígeno**

El oxígeno es un componente ambiental de la atmósfera que influye en la inactivación de muchos tipos de bioaerosoles, pero su toxicidad no está relacionada con la forma diatómica (O_2) sino cuando se convierte en otras formas reactivas (peróxido de hidrógeno, radicales de hidróxido, etc.). Los radicales de hidróxido llegan naturalmente en el ambiente por la acción de la luz, radiación UV, contaminación, entre otros; dichas formas reactivas del oxígeno causan daños en el ADN de los bioaerosoles, impidiendo su reproducción. (Pepper & Gerba, 2015).

❖ **Velocidad del viento**

La velocidad del viento es una variable poco relacionada con la viabilidad de los bioaerosoles, sin embargo puede llegar a ser crucial para la supervivencia de los microorganismos, ya que de ella dependerá en gran medida el tiempo al cual estarán

expuestos los microorganismos a las variables físico-químicas de la masa de aire donde realizan sus procesos de emisión y transporte, así mismo determinarán la distancia máxima que podrán llegar a recorrer los bioaerosoles en función de su diámetro (Camargo et al., 2011).

❖ Radiación

Las principales fuentes de radiación que causan daños a los bioaerosoles, son las ondas UV más cortas y la radiación ionizante como los rayos X. El principal daño de la radiación UV es en los nucleótidos, los cuales forman el ADN y así mismo causa inhibición de la actividad biológica como la replicación del genoma, transcripción y traducción (Pepper & Gerba, 2015).

6. Metodología

6.1 Área de estudio

6.1.1 Localización

El relleno sanitario se encuentra localizado a 15 kilómetros de Barranquilla, en la vía Juan Mina-Tubará, sobre un área total de 135 hectáreas (Figura 6-1), de las cuales 75 hectáreas son para la disposición de aproximadamente 1.300 toneladas diarias de desechos sólidos municipales. Para el proceso de tratamiento cuenta con una zona de descargue de residuos en donde son esparcidos y compactados (celda activa), las terrazas de las celdas de disposición generan evacuación de gases producidos por la degradación anaerobia de los residuos orgánicos (Vélez-Pereira & Camargo, 2009), y con un sistema de tratamiento de lixiviados que se divide en tres fases: un desarenador, dos lagunas de sedimentación y tratamiento biológico.

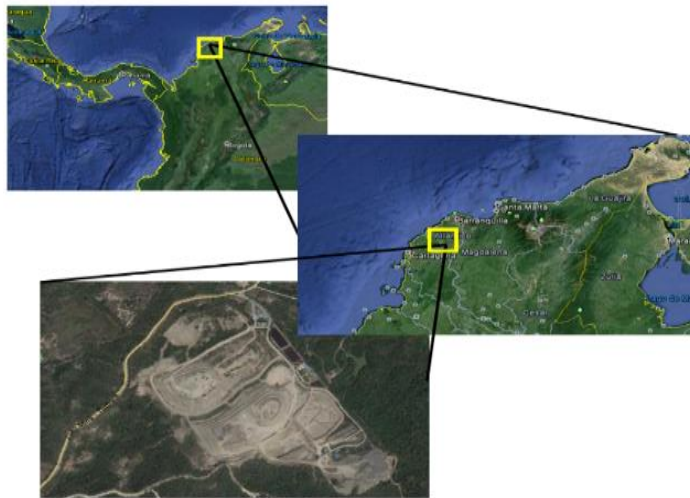


Figura 6-1: Área de estudio.

Fuente: Google Earth (2016).

6.1.2 Condiciones climatológicas

El área de estudio se caracteriza por presentar pocos días lluviosos, los totales anuales no sobrepasan los 1000 mm (ver Figura 6-2). El número de días lluviosos durante el año oscila entre 50 y 100. El régimen intranual es de tipo bimodal; la principal temporada de lluvias se extiende de septiembre a noviembre y en el primer semestre se registra una corta temporada de aumento de lluvias principalmente en el mes de mayo. Las temporadas secas ocurren entre diciembre y abril, la principal, y una segunda, de menor intensidad en los meses de junio, julio y agosto (IDEAM, 2005).

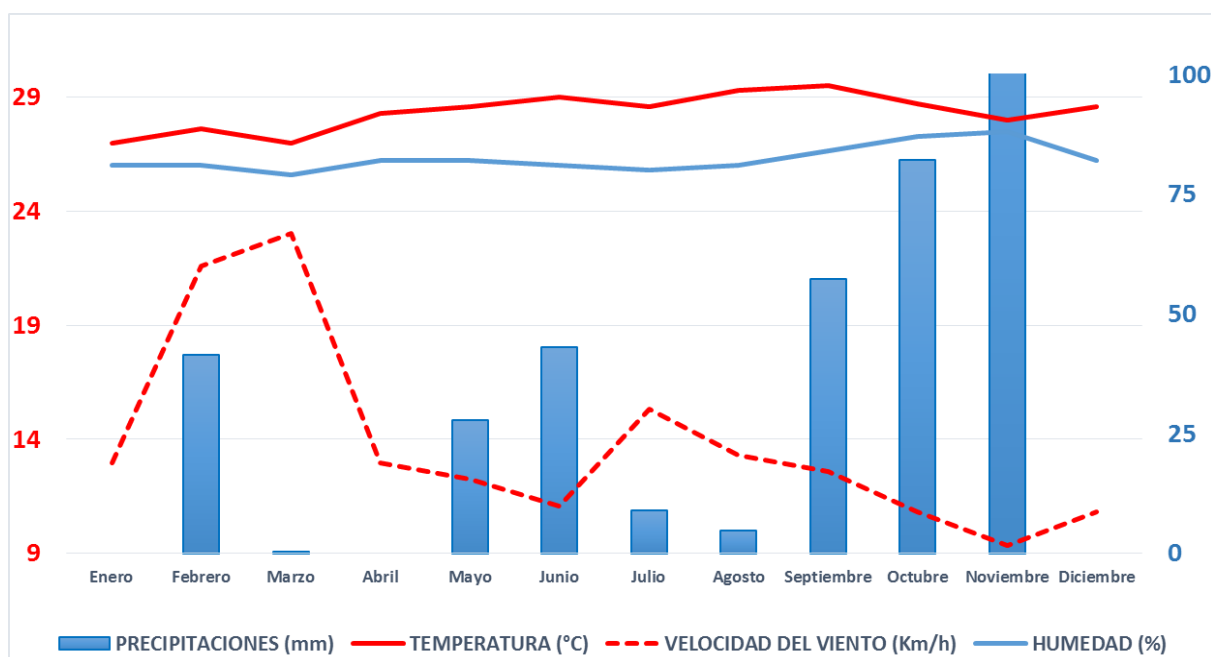


Figura 6-2: Variables meteorológicas en el departamento del Atlántico (año 2015).

Fuente: Datos suministrados por el IDEAM.

Por otra parte, la temperatura media en el relleno sanitario supera los 26°C y como consecuencia del régimen pluvial y térmico dominante en el área, el clima que se registra es de tipo cálido árido (IDEAM, 2005). Con respecto a la velocidad del viento se alcanzan magnitudes de hasta 18 km/h en promedio (IDEAM & UPME, 2006). Mientras que la predominancia de la dirección del viento es NE (IDEAM, 2005). La humedad relativa

presenta una oscilación entre el 78% y el 86% aproximadamente, tal como lo reporta IDEAM (2005).

6.2 Muestreo en el área de estudio

6.2.1 Estaciones de muestreo

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se ubicaron cuatro (4) estaciones de monitoreo en las instalaciones del relleno sanitario objeto de estudio.

La selección de las estaciones, se realizó teniendo en cuenta la dirección del viento predominante y el eje de acuerdo con las diferentes etapas del proceso de tratamiento de residuos sólidos. Es así como las estaciones quedaron repartidas de la siguiente forma: celda pasiva 1, celda pasiva 2, celda activa y finalmente una entre las dos piscinas de lixiviados. No se realizó monitoreo en el área de tratamiento de lixiviado debido a que se trataba de un ambiente indoor.

Las estaciones definidas fueron evaluadas a través de la realización de un premuestreo, las cuales se georreferenciaron utilizando un GPS marca Garmin Oregon 550 (ver Tabla 6-1).

Tabla 6-1: *Coordenadas de las estaciones (S) de muestreo.*

Estación		Coordenadas	
Celda pasiva 1		N10°55'50.84"	W74°55'32.92"
Piscinas de lixiviados		N10°55'56.58"	W74°55'22.92"
Celda pasiva 2		N10°55'46.06"	W74°55'24.31"
Celda activa	Campaña 1	N10°55'40.87"	W74°55'30.43"
	Campaña 2	N10°55'41.41"	W74°55'31.69"
	Campaña 3	N10°55'41.60"	W74°55'30.50"
	Campaña 4	N10°55'43.50"	W74°55'30.30"
	Campaña 5	N10°55'39.91"	W74°55'27.91"
	Campaña 6	N10°55'41.56"	W74°55'31.94"

Fuente: Autores.

A continuación se detallan las condiciones de cada una de las estaciones de monitoreo y la ubicación de estas en un plano del área de estudio (ver Figura 6-3):

- **Celda pasiva 1:** Ubicada en una terraza, específicamente en el eje central de tres vasos (Vaso 1-3). Cuenta con chimeneas activas.
- **Celda pasiva 2:** Ubicada en un punto equidistante (Vaso 4-5). Cuenta con chimeneas activas.
- **Celda activa:** Ubicada aproximadamente a 6m de la operación en la dirección del viento. Esta estación es la única que cambia su ubicación según el plan de trabajo del relleno, de acuerdo a Vélez-Pereira, 2008.
- **Piscinas de Lixiviado:** Estación ubicada en medio de dos piscinas de lixiviados del relleno sanitario.

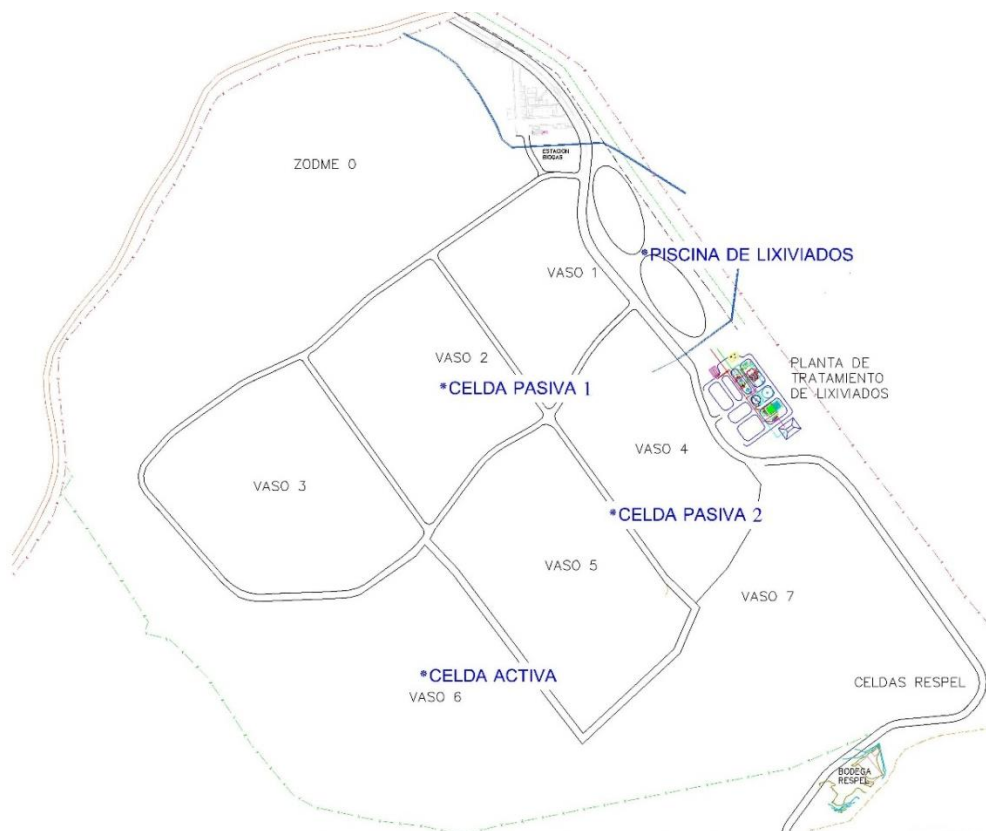


Figura 6-3: Ubicación de estaciones en el relleno sanitario.

Fuente: Autores.

6.3 Toma de muestras

La metodología implementada para la ejecución de este proyecto es basada en lo propuesto en la investigación de Camargo et al, 2011.

La recolección de la muestra se realizó por un lapso de tiempo de 5 minutos, el cual fue establecido mediante el desarrollo de un pre-muestreo; en este proceso se probaron los tiempos de 3, 5 y 10 minutos de acuerdo a la información consignada en diferentes estudios con el mismo principio de muestreo (activo y por impactación). El tiempo seleccionado fue aquel que mostró una mejor precisión y exactitud de las concentraciones en las distintas etapas del impactador de cascada. La recolección de la muestra se llevó a cabo en dos jornadas, mañana desde las 7:00 am a 11:00 am y tarde de 12:30 pm. El muestreo se realizó a lo largo de 6 meses de abril-agosto y octubre del 2015, una vez por mes.

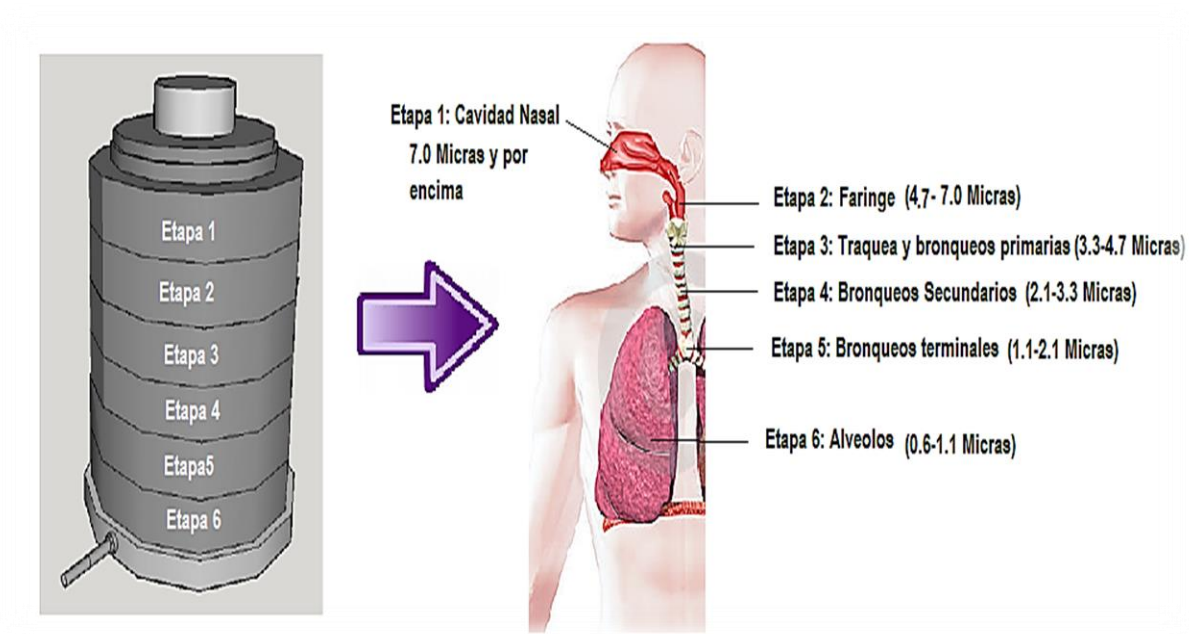


Figura 6-4: Impactador de cascada de seis etapas como simulador del sistema respiratorio del ser humano.

Fuente: Autores.

Para la colecta de microorganismos se utilizó un impactador de cascada Andersen Thermo Scientific a una altura de 1,5m. Este equipo se asemeja a las partes externas del tracto respiratorio y dispone de seis (6) etapas (ver Figura 6-4). En el muestreador la velocidad del aire se incrementa de una etapa a la siguiente y succiona un flujo de aire de 28,3 L/min (Jo & Seo, 2005; Lee & Jo, 2006; Heo et al., 2010) que arrastra las partículas viables por medio de una bomba de vacío. Al mismo tiempo, fue utilizado el anemómetro Kestrel Modelo 4500 710830 (calibrado previamente), el cual permitió la medición de las variables meteorológicas (humedad, temperatura y velocidad del viento).

Las muestras fueron tomadas por triplicado en cada uno de los medios de cultivo específicos. Los medios utilizados fueron Sabouraud Dextrosa para hongos y Standard Plate Count para bacterias mesófilas. La preparación de los medios se realizó siguiendo el protocolo de las marcas Scharlau y Oxid, en donde se esterilizaron a 121°C durante 15 minutos y posteriormente fueron servidos en cajas de Petri (30mL c/u).

6.4 Análisis de las muestras

6.4.1 Cuantificación e identificación del material

Posterior al monitoreo se procede a incubar las muestras a una temperatura de 25°C para hongos durante 5 días y a 37°C para bacterias mesófilas durante 48 horas; luego es realizado conteo de las Unidades Formadoras de Colonias (UFC) presentes en las cajas de Petri de acuerdo a las características macroscópicas de las bacterias y hongos.

Una vez contadas las colonias de microorganismos se procedió a realizar la tinción de Gram a las colonias de bacterias obtenidas lo cual permitió conocer la morfología y la Gram predominante. Para el caso de los hongos, fue realizada la tinción con azul de lactofenol para identificación microscópica, en la cual se observan las estructuras reproductivas y micelio de la morfología y clasifica siguiendo las claves taxonómicas de Bungartz, 2002.

6.4.2 Determinación de la concentración

Para la determinación de la concentración de bioaerosoles, en Unidades Formadoras de Colonias (UFC) por m³, se empleó la Ec. 7-1.

$$\text{Concentración de bioaerosoles } \left(\frac{\text{UFC}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{CC} * 1000}{Q * T} \quad (\text{Ec. 6 - 1})$$

Donde CC es la cantidad de colonias contadas en cada muestra, 1000 es un factor de conversión de unidades, Q el caudal de aire que ingresa en el impactador de cascada (28,3 L/min) y T el tiempo de colecta de los bioaerosoles (5 min).

6.4.3 Análisis e interpretación de los resultados

Los resultados obtenidos fueron sistematizados en una hoja de Excel por cada microorganismo, campaña, jornada, estación de monitoreo y réplica. Esta información permitió realizar el análisis de los datos mediante el software Statgraphics Centurion XVI, aplicando el coeficiente de correlación de Spearman, con el fin de conocer el grado de asociación o interdependencia de las variables meteorológicas medidas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) con las concentraciones obtenidas de los bioaerosoles (aerobacterias y hongos), es decir, será posible determinar si la concentración de los bioaerosoles se ve afectada de manera directa o indirecta por cada parámetro meteorológico en una determinada jornada. Además, se realizó un análisis estadístico mediante ANOVA jerarquizado o anidado, el cual permitió establecer si existen diferencias significativas entre los factores o variables independientes, en este caso las estaciones de monitoreo, la jornada y la campaña, e inclusive para conocer la varianza de un determinado factor con respecto a la media.

Por otra parte, para desarrollar la distribución espacio-temporal de la concentración de los bioaerosoles se realizaron mapas de isoconcentración utilizando el programa Golden Surfer 11, el cual permite analizar las concentraciones en distintas isolíneas, y así mismo conocer

las zonas con mayor o menor concentración de bioaerosoles en una determinada jornada y campaña.

7. Resultados

7.1 Concentración de los bioaerosoles

En la Tabla 7-1 se presentan las concentración de bioaerosoles (aerobacterias y hongos) en las etapas de tratamiento del relleno sanitario objeto de estudio, durante las seis campañas de monitoreo, en las dos jornadas seleccionadas. El máximo promedio geométrico de aerobacterias se presenta en la jornada de la tarde en la Celda activa, mientras que el mínimo se reporta en la celda pasiva 1 en la misma jornada. En los resultados por jornada, se encuentra que para las aerobacterias en la jornada de la mañana, el mínimo es en la estación ubicada en la celda pasiva 2 y el máximo en la celda activa.

Tabla 7-1: *Concentración (UFC/m³) de bioaerosoles en el relleno sanitario.*

Tipo	Estación	Jornada	Campaña N°						Promedio geométrico
			1	2	3	4*	5	6*	
Aerobacterias	S1	M	395.75 ± 261.48	141.34 ± 62.81	325.08 ± 137.58	428.73 ± 275.64	315.66 ± 165.78	188.45 ± 77.52	278.22
		T	270.9 ± 120.21	176.67 ± 113.73	433.45 ± 92.23	89.51 ± 77.84 ⚡	270.91 ± 185.68	108.36 ± 21.59 ⚡	194.72
	S2	M	117.78 ± 29.42	374.55 ± 147.56	372.2 ± 38.92	318.02 ± 86.84	508.83 ± 599.83	124.85 ± 48.10	263.1
		T	167.25 ± 24.81	242.63 ± 84.90	899.88 ± 403.77	409.89 ± 171.51	1005.89 ± 600.38	120.14 ± 24.48	349.06
	S3	M	134.27 ± 81.50	28.26 ± 18.69 ⚡	254.41 ± 125.62 ⚡	351 ± 259.31	353.36 ± 194.44	1027.09 ± 596.38	223.01
		T	108.36 ± 38.92 ⚡	313.3 ± 138.90	532.39 ± 82.81	233.21 ± 81.50	266.19 ± 139.62 ⚡	1590.1 ± 856.17 ¥	348.26
	S4	M	520.61 ± 501.83	299.17 ± 279.15	266.19 ± 164.27	1943.46 ± 2492.11 ¥	1717.31 ± 855.21 ¥	1241.46 ± 713.61	745.58
		T	1856.3 ± 1050.99 ¥	548.88 ± 187.82 ¥	1090.69 ± 712.07 ¥	409.89 ± 39.34	1184.92 ± 947.16	699.64 ± 472.86	850.18
Aerosoles fúngicos	S1	M	876.32 ± 207.12 ¥	327.44 ± 63.34	237.92 ± 76.22	433.45 ± 174.59	122.49 ± 60.10 ⚡	294.46 ± 144.89	319.68
		T	200.23 ± 132.27 ⚡	652.53 ± 216.36 ¥	240.28 ± 110.16	431.09 ± 85.68	193.16 ± 91.14	87.16 ± 20.40 ⚡	247.14
	S2	M	664.31 ± 251.15	492.34 ± 85.48	287.39 ± 114.89 ¥	800.94 ± 318.59 ¥	131.91 ± 48.10	313.31 ± 60.10	382.09
		T	650.17 ± 111.06	508.83 ± 81.50	169.61 ± 127.40	659.59 ± 222.84	242.63 ± 66.79	143.69 ± 114.24	329.95
	S3	M	308.59 ± 21.59	226.14 ± 147.56 ⚡	160.18 ± 22.71	362.77 ± 152.28	169.61 ± 32.38	405.18 ± 17.78 ¥	255.58
		T	431.09 ± 39.34	482.92 ± 124.49	73.02 ± 26.75 ⚡	-	228.5 ± 71.14	263.83 ± 115.11	246.85
	S4	M	252.06 ± 99.02	334.51 ± 85.19	146.05 ± 38.92	313.3 ± 52.09 ⚡	138.98 ± 35.57	398.12 ± 294.31	244.47
		T	464.07 ± 124.49	280.32 ± 111.81	209.65 ± 173.15	412.24 ± 196.40	327.44 ± 51.12 ¥	197.88 ± 56.09	299.97

S: Estación, **S1:** Celda pasiva 1, **S2:** Piscinas de lixiviados, **S3:** Celda pasiva 2, **S4:** Celda activa, **M:** Mañana, **T:** Tarde. - Sin crecimiento de microorganismos. *Jornada con precipitaciones. ⚡ Valor mínimo en la campaña. ¥ Valor máximo en la campaña.

Los reportes de la jornada de la tarde arrojan que el valor más bajo es obtenido en la celda pasiva 1, mientras que la máxima reportada es en la celda activa. De conformidad a los

valores reportados por campañas, se presenta en el caso de las aerobacterias un valor mínimo en la campaña 2 en la jornada de la mañana en la celda pasiva 2 y un valor máximo en la campaña 4 para la misma jornada en la celda activa.

En el caso de los hongos el máximo promedio reportado se presenta en la jornada de la mañana en las piscinas de lixiviados y el mínimo valor se presenta en la jornada de la mañana en la celda activa. En la jornada de la mañana se presenta un mínimo en la celda activa, y un máximo en la estación ubicada entre las piscinas de lixiviados; en la jornada de la tarde se percibe como valor mínimo en la celda pasiva 2, y como valor máximo la estación ubicada entre las piscinas de lixiviados.

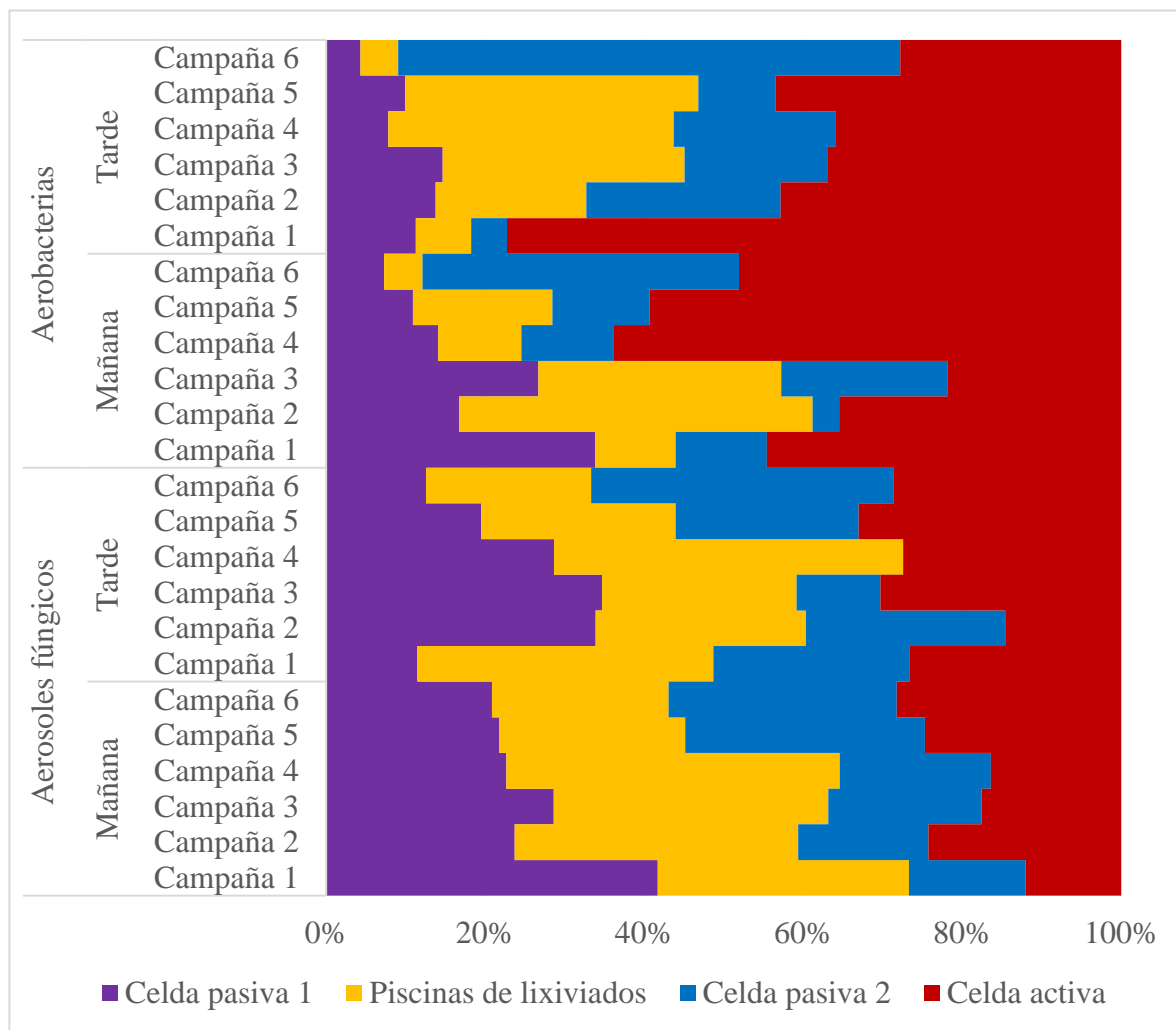


Figura 7-1: Porcentajes de la concentración de bioaerosoles (aerobacterias y hongos).

Durante las campañas de muestreo, la campaña 4 presenta el menor valor durante la jornada de la tarde en la celda pasiva 2, ya que no hubo crecimiento de microorganismos, y el valor máximo en la campaña 1 durante la jornada de la mañana en la celda pasiva 1. Al realizar una comparación general de las concentraciones registradas, se observa que el rango de concentraciones de aerobacterias es mayor al de hongos en las distintas campañas de monitoreo; así mismo, los valores máximos superiores corresponden a aerobacterias. En la Figura 7-1 se presentan los porcentajes de la concentración de bioaerosoles (aerobacterias y hongos) por campaña y jornada en cada una de las estaciones monitoreadas. A nivel general las estaciones de monitoreo en donde se reportan mayores concentraciones de bioaerosoles es en la celda activa y en las piscinas de lixiviados, seguido en menor medida por las estaciones ubicadas en las celdas pasivas. En adición, las mayores concentraciones de la celda activa se reportan en la jornada de la tarde; sin embargo, en el caso de las piscinas de lixiviados se presentan en la mañana. En la celda pasiva 1 los mayores porcentajes corresponden a la jornada de la mañana, aunque en la celda pasiva 2 se registran en la tarde.

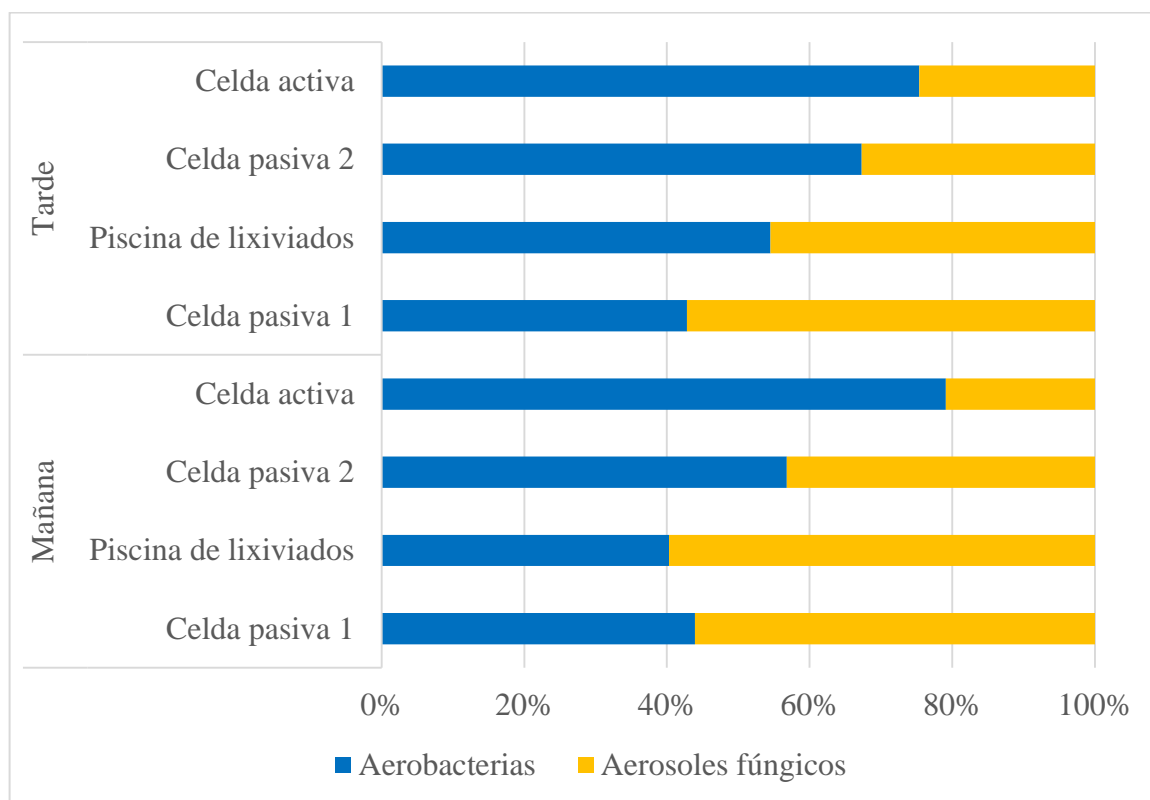


Figura 7-2: Distribución en porcentaje por tipo de microorganismo.

En la Figura 7-2 se presenta la distribución en porcentaje por tipo de microorganismo, de la cual se observa una clara predominancia de las aerobacterias en la celda activa tanto en la jornada de la mañana (79.09%) como en la tarde (75.38%), mientras que en el resto de las estaciones la proporción es muy cercana en ambos tipos de microorganismos.

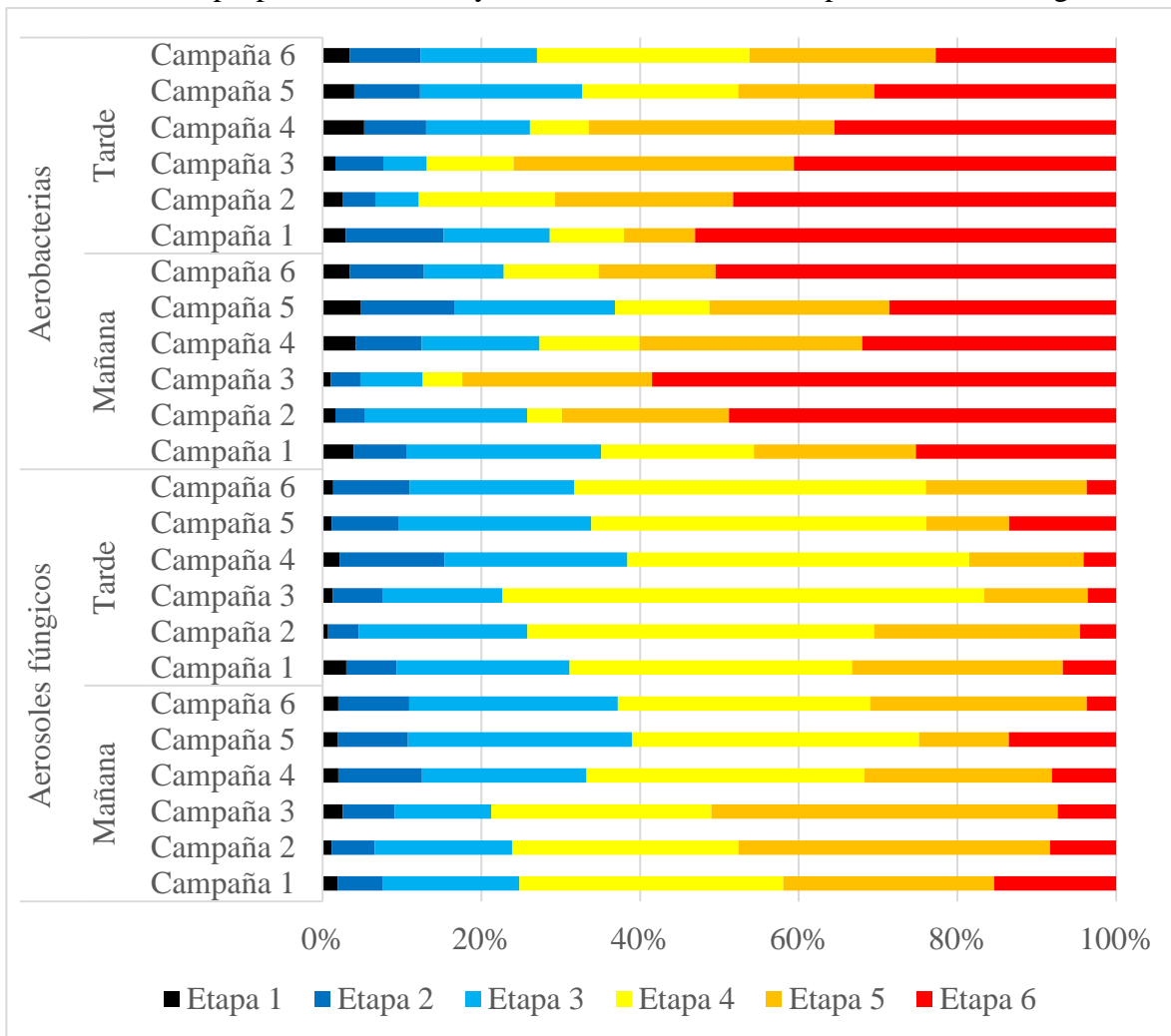


Figura 7-3: Distribución de la concentración de bioaerosoles por etapas del impactador.

Finalmente la Figura 7-3 se presenta la distribución de la concentración de bioaerosoles (aerobacterias y hongos) por etapas del impactador de cascada. Las aerobacterias tienden a acumularse principalmente en la etapa 6, equivalente a los alveolos en el sistema respiratorio humano, mientras que los hongos en la etapa 4 (bronquios secundarios). Tanto las aerobacterias como hongos tienden a depositarse en menor medida en las etapas 1 (cavidad nasal) y 2 (faringe). En cuanto a la jornada, las aerobacterias se acumulan más en

la etapa 6 que durante la mañana, mientras que los hongos la mayor acumulación se presenta en la jornada de la tarde en la etapa 4.

7.2 Identificación de los bioaerosoles

Tabla 7-2: *Clasificación de aerobacterias según su morfología.*

Morfología	Mañana				Tarde				Promedio	
	Celda pasiva 1	Celda pasiva 2	Piscinas de lixiviados	Celda activa	Celda pasiva 1	Celda pasiva 2	Piscinas de lixiviados	Celda activa	(UFC/m3)	(%)
Bacilos aislados	511.19	1050.65	760.90	2991.76	202.59	1823.32	530.04	1547.70	1177.27	37.56
Estreptobacilos	845.70	881.04	772.67	1910.48	822.14	991.76	2011.78	3191.99	1428.45	45.57
Espiroquetas	355.71	103.65	164.90	961.13	256.77	142.52	244.99	862.19	386.48	12.33
Estreptococos	102.47	130.74	134.28	108.36	77.74	120.14	77.74	190.81	117.79	3.76
Cocos				11.78	7.07	7.07	16.49	10.60	10.60	0.34
No identificada				14.13		14.13			14.13	0.45

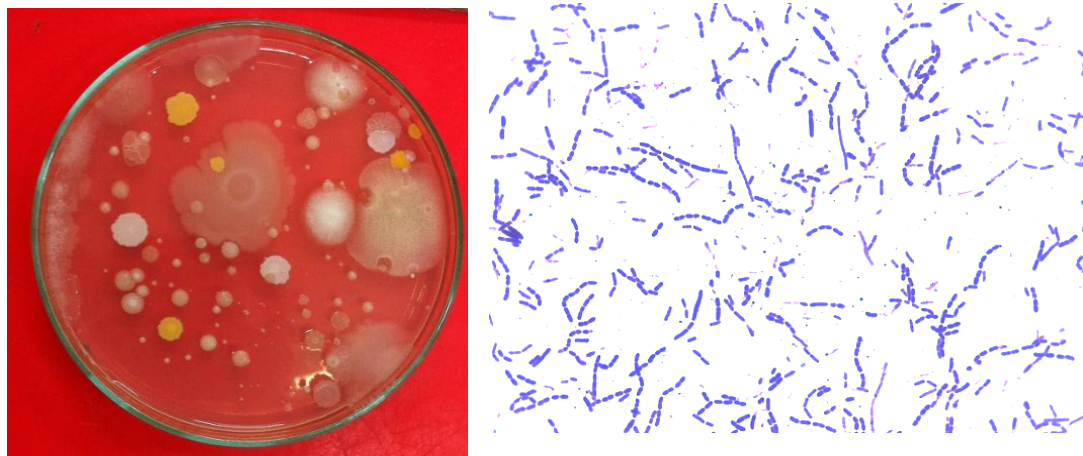


Figura 7-4: Especie perteneciente a la morfología de estreptobacilos.

Fuente: Autores.

En la Tabla 7-2 se presenta las concentraciones según la clasificación de aerobacterias por jornada y estación. La morfología predominante corresponde a los estreptobacilos (Ver figura 7-4), seguido de los bacilos aislados y las espiroquetas, mientras que las menores concentraciones son de estreptococos y cocos; tan sólo un 0.45% del total no pudo ser identificado. Así mismo, durante la jornada de la tarde se reportan mayores concentraciones de estreptobacilos que en la mañana, siendo la celda activa la estación de mayor aporte. Sin

embargo, para el caso de los bacilos aislados los valores superiores se presentan en la jornada de la mañana aunque al igual que los estreptobacilos se obtienen en la celda activa.

Tabla 7-3: Clasificación de hongos según su género.

Género	Mañana				Tarde				Promedio	
	Celda pasiva 1	Celda pasiva 2	Piscinas de lixiviados	Celda activa	Celda pasiva 1	Celda pasiva 2	Piscinas de lixiviados	Celda activa	(UFC/m3)	(%)
<i>Aspergillus</i>	949.35	376.91	706.71	379.27	560.66	506.48	584.22	388.69	556.54	30.72
<i>Blastomyces</i>	96.58	75.38	80.09	49.47	16.49	35.34	38.87	153.12	68.17	3.76
<i>Curvularia</i>	11.78	40.05	47.11	7.07	21.20	14.13	16.49	11.78	21.20	1.17
<i>Fusarium</i>	63.60	25.91	65.96	16.49	38.87	56.54	42.40	103.65	51.68	2.85
<i>Geotrichum</i>	277.97	320.38	360.42	348.65	249.71	190.81	391.05	367.49	313.31	17.29
<i>Penicillium</i>	709.07	522.97	1050.65	405.18	767.96	586.57	1020.02	482.92	693.17	38.26
<i>Rhizopus</i>	44.76	56.54	49.47	84.81	28.27	23.56	28.27	134.28	56.24	3.10
No identificado	28.27	14.13	56.54	40.05	40.05	23.56	115.43	94.23	51.53	2.84

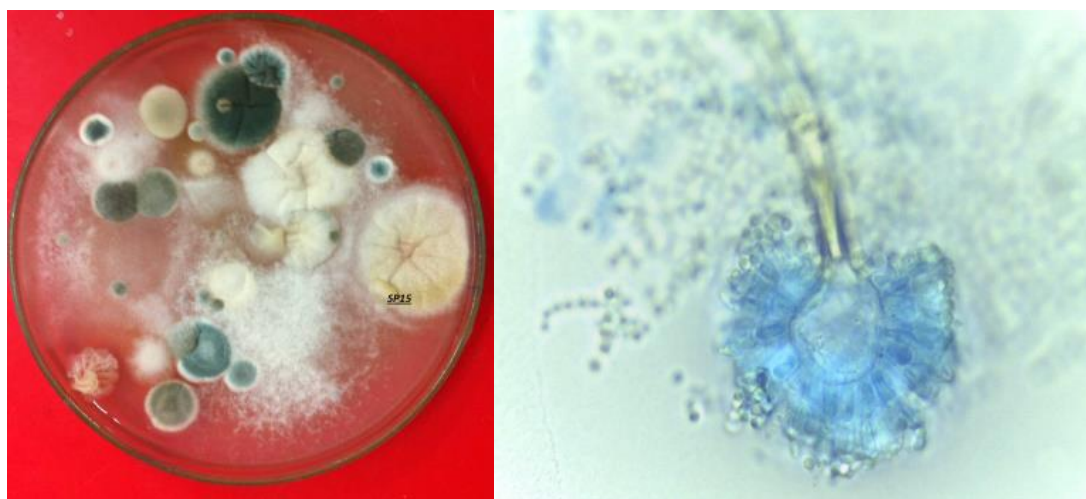


Figura 7-5: Especie perteneciente al género *Aspergillus*.

Fuente: Autores.

Por otro lado en la Tabla 7-3 se presenta la clasificación de hongos según su género por jornada y estación. Las mayores concentraciones la presenta el géneros *Penicillium*, seguido de *Aspergillus* (Ver Figura 7-5) y *Geotrichum*. Mientras que los menos abundantes son *Curvularia*, *Fusarium* y *Rhizopus*. La jornada con mayor aporte del género *Penicillium* corresponde a la tarde, principalmente de las piscinas de lixiviados, mientras que para los géneros *Aspergillus* y *Geotrichum* los valores superiores se registran en la mañana, en la celda pasiva 1 y las piscinas de lixiviados.

7.3 Distribución espacio-temporal de los bioaerosoles

En la Figura 7-6 se presenta la distribución espacio-temporal de la concentración de aerobacterias, en la cual se observa una elevada concentración en la celda activa. Además, se observan considerables concentraciones de aerobacterias en las piscinas de lixiviados.

Por otra parte, en las celdas pasivas se aprecia una baja concentración de aerobacterias, exceptuando los casos de la campaña 4 en la jornada de la tarde y la campaña 6 en la jornada de la mañana y tarde respectivamente.

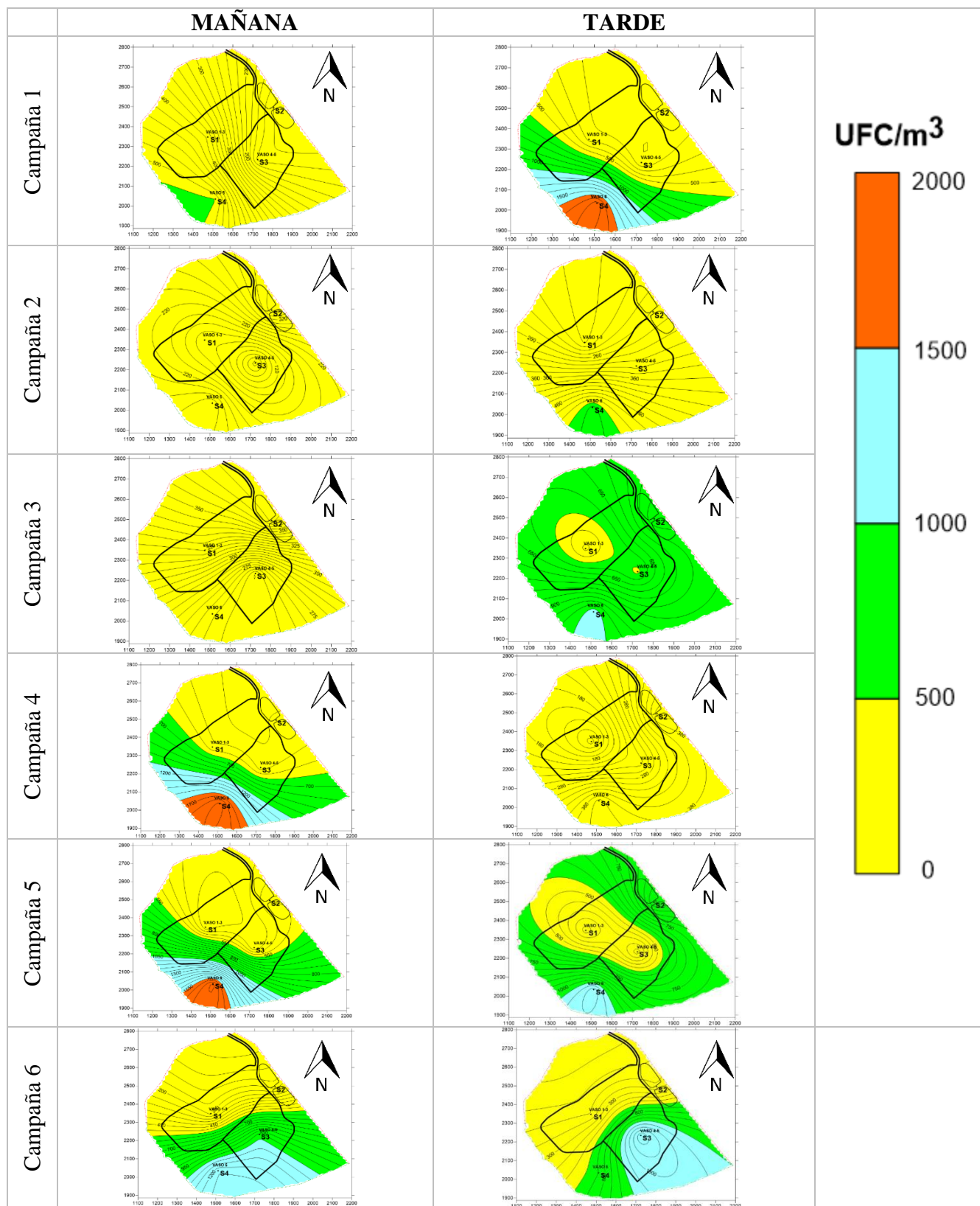


Figura 7-6: Distribución espacio-temporal de aerobacterias en las jornadas de la mañana y tarde. S1: Celda pasiva 1. S2: Piscina de lixiviados. S3: Celda pasiva 2. S4: Celda activa.
Fuente: Autores.

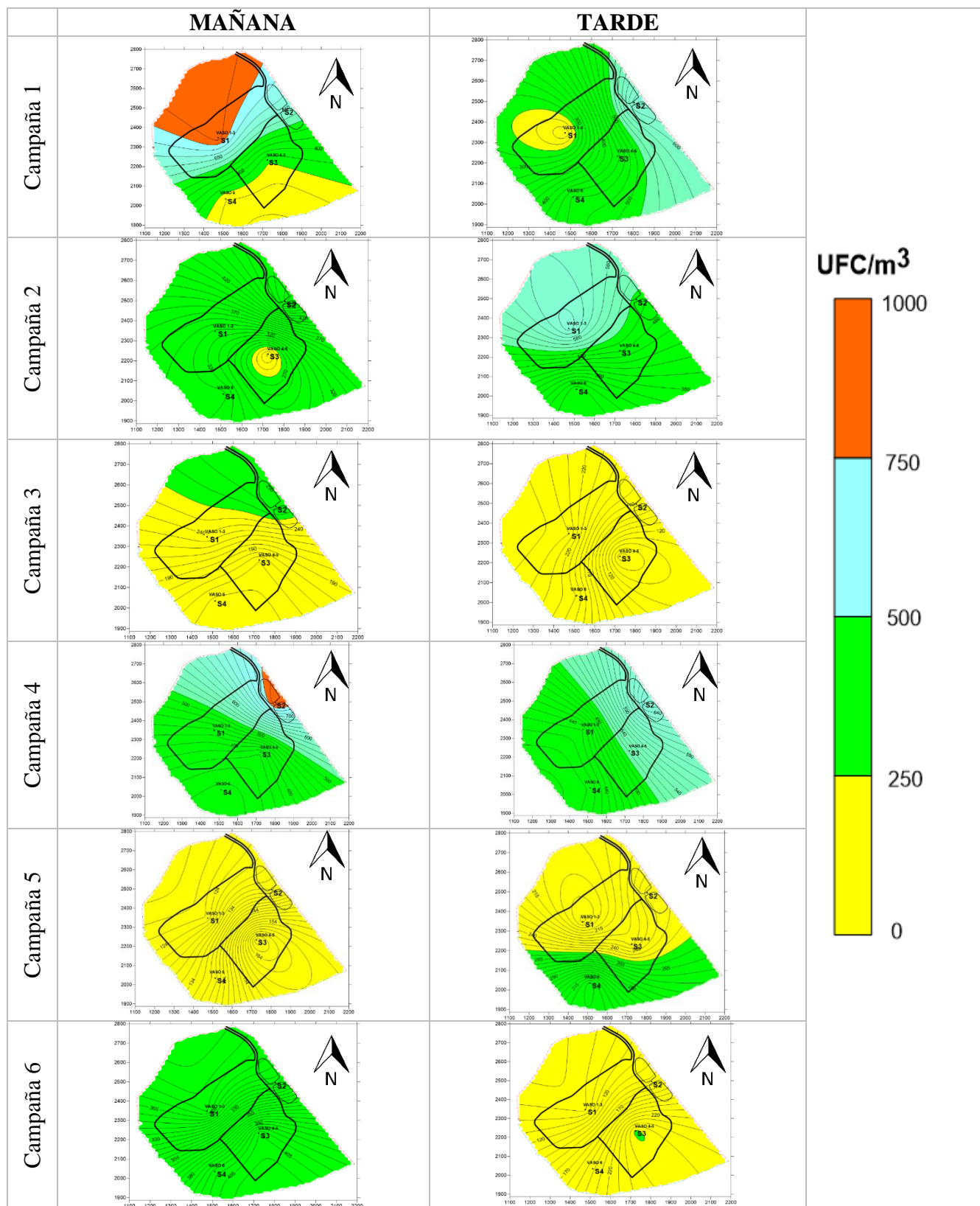


Figura 7-7: Distribución espacio-temporal de aerosoles fúngi en las jornadas de la mañana y tarde. S1: Celda pasiva 1. S2: Piscina de lixiviados. S3: Celda pasiva 2. S4: Celda activa.
Fuente: Autores.

En la Figura 7-7 se observa la distribución espacio-temporal de la concentración de los aerosoles fúngicos, en la cual se observa una elevada concentración en la piscina de lixiviados. Además, se analizan concentraciones considerables de este tipo de bioaerosoles en la celda pasiva 1 para las dos jornadas.

7.4 Análisis de las variables meteorológicas

Tabla 7-4: Variables meteorológicas de las distintas campañas de monitoreo.

Jornada		Estación	Campaña N°						Promedio
			1	2	3	4	5	6	
Temperatura (°C)	Mañana	S1	28.98 ± 0.24	29.62 ± 0.58	30.54 ± 0.36	28.33 ± 1.40	30.28 ± 0.97	27.48 ± 0.26	29.2 ± 1.17
		S2	32.45 ± 0.45	34.64 ± 0.62	32.29 ± 0.43	32.47 ± 1.74	34.25 ± 0.75	29.62 ± 0.88	32.62 ± 1.78
		S3	31.85 ± 0.47	31.13 ± 0.30	32.24 ± 0.25	28.77 ± 1.22	34.74 ± 0.61	31.74 ± 1.00	31.74 ± 1.92
		S4	34.68 ± 0.73	33.24 ± 0.80	33.72 ± 0.29	33.56 ± 1.13	36.46 ± 0.77	34.29 ± 0.37	34.32 ± 1.16
	Tarde	S1	33.68 ± 0.23	34.5 ± 0.63	28.13 ± 0.05	28.12 ± 1.18	35.45 ± 0.33	26.90 ± 0.18	31.13 ± 3.80
		S2	33.13 ± 0.69	33.08 ± 0.37	28.27 ± 0.07	29.16 ± 0.64	34.56 ± 0.66	29.09 ± 0.16	31.21 ± 2.67
		S3	30.78 ± 1.02	31 ± 0.53	30.04 ± 0.61	27.87 ± 1.22	32.59 ± 0.22	29.54 ± 0.53	30.3 ± 1.58
		S4	29.97 ± 0.72	30.34 ± 0.24	32.50 ± 1.11	28.85 ± 0.81	32.53 ± 0.87	28.48 ± 0.42	30.44 ± 1.74
	Promedio	Mañana	31.99 ± 2.34	32.15 ± 2.23	32.19 ± 1.30	30.78 ± 2.62	33.93 ± 2.61	30.78 ± 2.91	-
		Tarde	31.89 ± 1.79	32.23 ± 1.91	29.73 ± 2.03	28.5 ± 0.60	33.78 ± 1.45	28.5 ± 1.15	-
Humedad Relativa (%)	Mañana	S1	75.61 ± 0.97	71.54 ± 1.99	72.90 ± 1.18	86.93 ± 5.35	84.66 ± 4.35	89.73 ± 0.85	80.22 ± 7.81
		S2	64.86 ± 0.70	56.76 ± 2.23	67.7 ± 1.56	67.07 ± 6.67	66.73 ± 2.10	82.75 ± 4.21	67.64 ± 8.43
		S3	65.69 ± 1.63	65.79 ± 0.82	65.13 ± 0.94	85.55 ± 4.23	59.39 ± 1.68	70.58 ± 3.20	68.68 ± 8.99
		S4	58.12 ± 2.29	59.26 ± 2.53	60.27 ± 0.98	63.97 ± 4.78	53.47 ± 1.98	60.47 ± 1.27	59.26 ± 3.44
	Tarde	S1	59.52 ± 0.64	54.83 ± 1.78	78.58 ± 0.42	84.95 ± 5.78	59.35 ± 0.86	90.98 ± 0.86	71.36 ± 15.35
		S2	61.48 ± 2.36	60.07 ± 1.24	80.06 ± 0.25	81.52 ± 2.56	61.95 ± 1.94	80.78 ± 1.28	70.97 ± 10.77
		S3	67.01 ± 6.06	66.55 ± 2.50	75.12 ± 1.67	86.81 ± 5.41	67.60 ± 1.00	80.08 ± 2.24	73.86 ± 8.33
		S4	72.50 ± 3.12	70.78 ± 0.70	66.07 ± 4.02	82.34 ± 3.11	66.02 ± 3.25	83.79 ± 1.83	73.58 ± 7.79
	Promedio	Mañana	66.07 ± 7.20	63.33 ± 6.66	66.5 ± 5.26	75.88 ± 12.04	66.06 ± 13.53	75.88 ± 12.96	-
		Tarde	65.12 ± 5.84	63.05 ± 7.03	74.95 ± 6.27	83.90 ± 2.42	63.73 ± 3.76	83.90 ± 4.98	-
Velocidad del Viento (m/s)	Mañana	S1	4.41 ± 0.40	2.81 ± 0.36	1.86 ± 0.26	1 ± 0.49	2.11 ± 0.77	1.06 ± 0.56	2.20 ± 1.27
		S2	1.11 ± 0.33	3.21 ± 0.32	1.04 ± 0.50	1.54 ± 0.44	0.76 ± 0.20	1.40 ± 0.55	1.51 ± 0.87
		S3	3.49 ± 0.39	3.38 ± 0.90	2.93 ± 0.27	1.47 ± 0.56	1.51 ± 0.49	1.84 ± 0.35	2.43 ± 0.93
		S4	1.44 ± 1.18	2.28 ± 0.32	3.21 ± 0.37	1.60 ± 0.38	2.26 ± 0.89	1.30 ± 0.20	2.01 ± 0.71
	Tarde	S1	3.29 ± 0.42	3.93 ± 0.88	3.81 ± 1.09	1.28 ± 0.96	3.58 ± 0.72	2.16 ± 0.16	3.00 ± 1.05
		S2	1.24 ± 1.02	2.83 ± 0.84	1.05 ± 0.22	1.08 ± 0.32	2.26 ± 0.66	0.36 ± 0.22	1.47 ± 0.90
		S3	4.69 ± 2.33	5.46 ± 0.92	3.66 ± 1.08	1.24 ± 1.04	4.53 ± 0.54	1.09 ± 0.31	3.44 ± 1.85
		S4	4.51 ± 0.74	4.02 ± 1.55	2.45 ± 1.52	1.36 ± 0.41	2.40 ± 0.32	1.36 ± 0.42	2.68 ± 1.32
	Promedio	Mañana	2.61 ± 1.59	2.92 ± 0.48	2.26 ± 0.99	1.40 ± 0.27	1.66 ± 0.68	1.4 ± 0.32	-
		Tarde	3.43 ± 1.58	4.06 ± 1.07	2.74 ± 1.28	1.24 ± 0.11	3.19 ± 1.07	1.24 ± 0.74	-

S1: Celda pasiva 1. **S2:** Piscinas de lixiviados. **S3:** Celda pasiva 2. **S4:** Celda activa.

En la Tabla 7-4 se presentan los valores de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) medidas en las distintas campañas de monitoreo.

En promedio, la temperatura en las campañas de muestreo oscila entre 28.5°C y 33.9°C, sin embargo se obtiene un valor máximo de 35.45°C en la campaña 5, durante la jornada de la tarde en la celda pasiva 1. Mientras que el mínimo es de 26.90°C en la campaña 6 durante la jornada de la tarde en la celda pasiva 1. Así mismo se observa que en la celda activa se presenta el mayor valor promedio mientras que la celda pasiva 1 presenta la menor.

La humedad relativa en promedio a lo largo de las campañas, oscila entre 63.1% y 83.9%; con un máximo de 91.0% en la campaña 6, durante la jornada de la tarde en la celda pasiva 1. El mínimo valor presentado es de 53.47% en la campaña 5, durante la mañana en la celda activa. La celda pasiva 1 presenta el mayor promedio de humedad relativa y la celda activa el menor. Finalmente, la velocidad del viento en promedio a lo largo de las campañas oscila entre 1.2 m/s y 4.1 m/s. Con una racha máxima de 5.5 m/s durante la campaña 2 en la jornada tarde, específicamente en la estación ubicada en la celda pasiva 2, y el valor mínimo 0.4 m/s en la campaña 6 durante la tarde en las piscinas de lixiviados.

7.5 Análisis estadístico

7.5.1 ANOVA jerarquizado

En la Figura 7-8 se observa que la media para la celda activa es superior con respecto a la media del resto de las estaciones de monitoreo. En adición, no hay diferencias significativas entre las jornadas (mañana y tarde), aunque sí se presentan diferencias significativas entre las etapas de tratamiento del relleno sanitario. Así mismo, la Figura 8-9 muestra que la estación que arrojó mayor varianza con respecto a la media fue la celda activa, y a su vez presentó diferencias significativas del resto de estaciones; sin embargo, en la celda pasiva 2 durante la jornada de la tarde se observa que existe una gran varianza en la campaña 6 con base en la media.

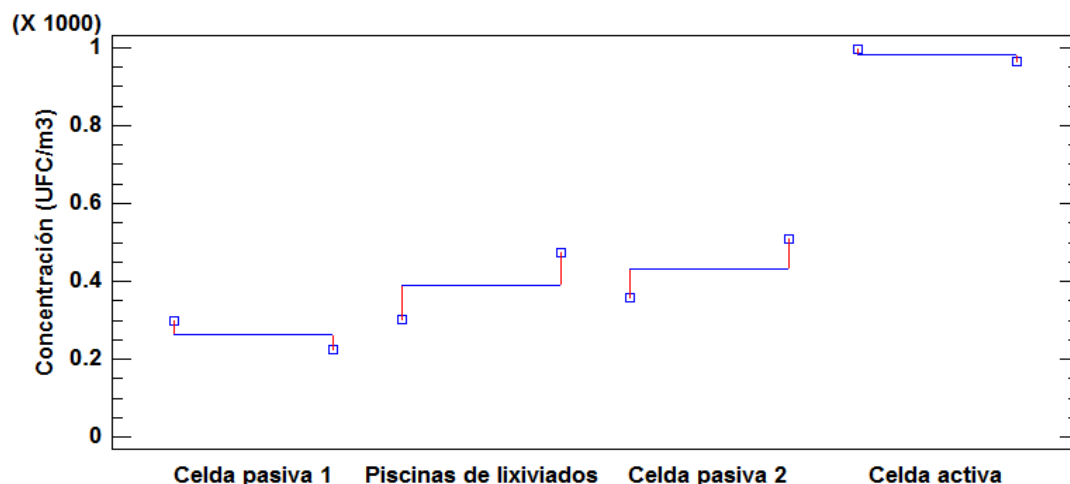


Figura 7-8: ANOVA jerarquizado para aerobacterias por estación. (□): jornada anidada (mañana y tarde respectivamente), (línea azul): media de las concentraciones, (línea roja): variabilidad de la jornada.

Además, de acuerdo a la Figura 7-9 el factor estadísticamente significativo en la concentración de aerobacterias a un nivel de confianza del 95% es la estación dado que el valor de P (0.0000) fue menor que 0.05, mientras que los valores P de la campaña (0.14) y la jornada (0.58) no presentaron significancia.

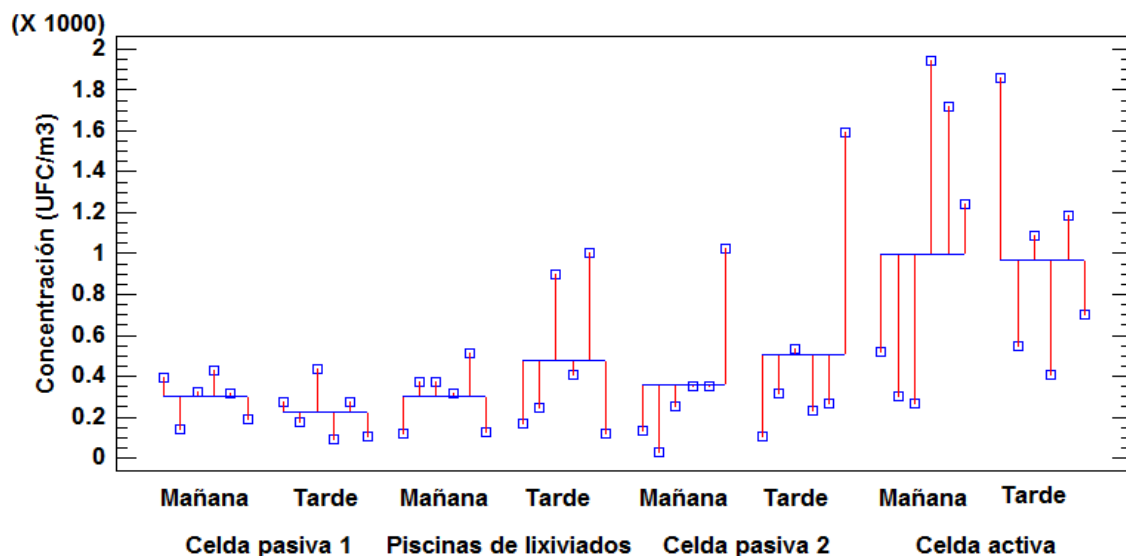


Figura 7-9: ANOVA jerarquizado para aerobacterias por jornada y estación. (□): campaña anidada, (línea azul): media de las concentraciones, (línea roja): variabilidad de la campaña.

Para el caso de los aerosoles fungí , según el ANOVA jerarquizado la estación entre piscinas de lixiviados cuenta con la media más alta, seguido de la celda pasiva 1, y en menor magnitud la celda pasiva 2 y celda activa; sin embargo, estas dos últimas no presentaron significancia entre sí (Figura 7-10). Cabe destacar que sólo la celda pasiva 1 presentó un poco de varianza en las jornadas. Esto se corrobora con el análisis de las jornadas, donde la estación piscinas de lixiviados presentó mayor dispersión en las campañas en ambas jornadas. Así mismo, la campaña 1 en la celda pasiva 1 para la mañana, se presentó una varianza alta con respecto a la media. Finalmente, de acuerdo a la Figura 7-11 los valores P del análisis para la estación (0.0043) y la campaña (0.0000) muestran una diferencia significativa entre los niveles de un factor con un nivel de significancia del 95% , siendo la estación entre las piscinas de lixiviados la que más influencia tiene en la variación de las concentraciones.

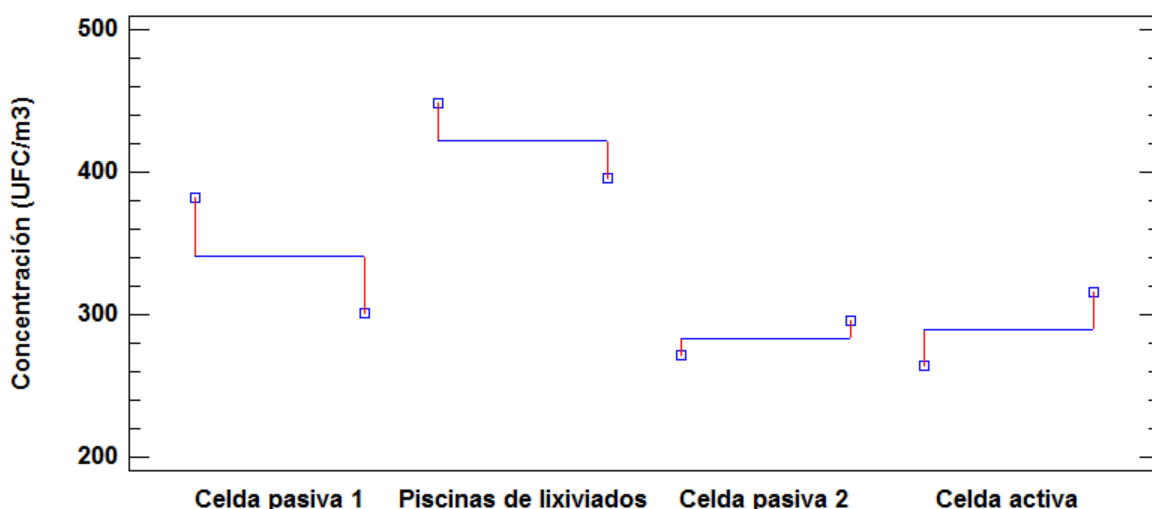


Figura 7-10: ANOVA jerarquizado para aerosoles fúngicos por estación. (□): jornada anidada (mañana y tarde respectivamente), (línea azul): media de las concentraciones, (línea roja): variabilidad de la jornada.

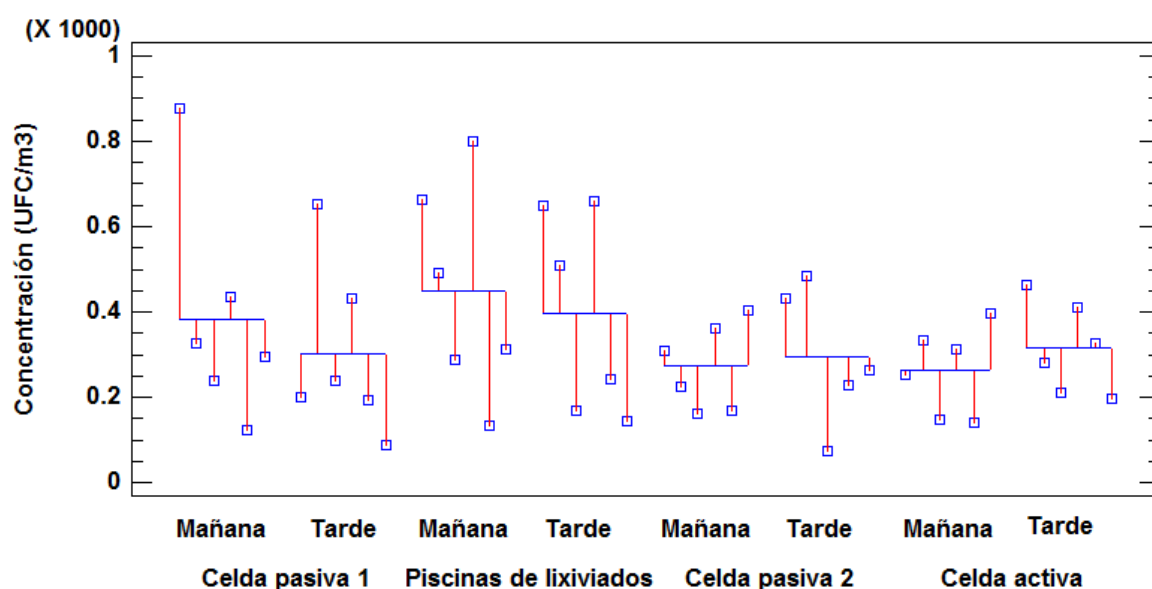


Figura 7-11: ANOVA jerarquizado para aerosoles fúngicos por estación y jornada. (□): campaña anidada, (línea azul): media de las concentraciones, (línea roja): variabilidad de la campaña.

7.5.2 Análisis de correlación de Spearman

Finalmente en la Tabla 7-5 se presentan los resultados del coeficiente de correlación de Spearman entre las variables con nivel de confianza del 95%. Los resultados muestran que la concentración de hongos presentó una correlación significativa indirecta con la temperatura y directa con la humedad relativa, ambas durante la jornada de la mañana; mientras que para las aerobacterias sólo se obtuvo una correlación significativa y directa en la mañana con la temperatura.

Tabla 7-5: Correlación entre la concentración de bioaerosoles y las variables meteorológicas.

Microorganismo	Jornada	Temperatura	Humedad Relativa	Velocidad del Viento
Aerobacterias	Mañana	0.3334*	-0.2076	-0.2012
	Tarde	0.0068	0.0239	-0.0088
Aerosoles fúngicos	Mañana	-0.2953*	0.2402*	0.1013
	Tarde	0.1249	-0.1893	0.1129

*significativo al 95%

8. Discusión de los resultados

8.1 Concentración de los bioaerosoles

A nivel general, las concentraciones de aerobacterias y aerosoles fúngicos obtenidas se encuentran por debajo de los valores máximos reportados por otras investigaciones, las cuales reportan intervalos entre 20-23.000 UFC/m³ y 17-480.000 UFC/m³, respectivamente (Flores et al., 2007; Malecka-Adamowicz et al., 2007; Vélez-Pereira & Camargo, 2009; Kalwasinska & Burkowska, 2013; Schlosser et al., 2016).

Así mismo, las concentraciones de aerobacterias en la celda activa son inferiores a los valores reportados por otros estudios, en los cuales se reportan intervalos desde 20-23.000 (Flores et al., 2007; Malecka-Adamowicz et al., 2007; Kalwasinska & Burkowska, 2013); mientras que para aerosoles fúngicos entre 59-480.000 (Flores et al., 2007; Malecka-Adamowicz et al., 2007; Vélez-Pereira & Camargo, 2009; Schlosser et al., 2016). Para el caso de la estación ubicada entre las piscinas de lixiviados, las concentraciones de ambos tipos de microorganismos son inferiores a las reportadas por Camargo et al. (2011).

Las mayores concentraciones de aerobacterias se reportaron en la celda activa, esto se puede atribuir a que en esta etapa del tratamiento los residuos están siendo sometidos a movimiento mecánico del material orgánico, y tal como lo ha demostrado Gomes et al. (2007) y Persson & Thaning (2014), las perturbaciones mecánicas favorecen la resuspensión de las partículas. Así mismo, los resultados de Rodríguez et al. (2005), Sánchez-Monedero et al. (2006) y Camargo et al. (2011), indicaron que las máximas concentraciones de aerobacterias se obtuvieron en la celda de operación coincidiendo con nuestros resultados.

Por otro lado, las altas concentraciones de aerosoles fúngicos entre las piscinas de lixiviados se pueden atribuir a las óptimas condiciones de humedad relativa en dicha estación, la cual osciló en promedio entre 56.76% y 82.75%, que permite la esporulación de estos microorganismos en el ambiente (Maier et al., 2000; Karra & Katsivela, 2007).

La predominancia de bioaerosoles respirables en la presente investigación coincide con otros estudios realizados, en los cuales se afirma que la mayor tendencia a la acumulación de aerobacterias se evidencia en las etapas 3, 4, 5 y 6 del impactador, mientras que los aerosoles fúngicos sólo en las etapas 3, 4 y 5; lo anterior debido al diámetro de las partículas (Rodríguez et al., 2005; Vélez-Pereira et al., 2010). De esta manera, se confirma la presencia de bioaerosoles que resultan perjudiciales a la salud de los trabajadores que laboran en el relleno sanitario e inclusive a las poblaciones aledañas, debido a la acumulación de las partículas en los pulmones, bronquios y alvéolos pudiendo provocar diversas enfermedades alérgicas, respiratorias crónicas e infecciosas graves (Rodríguez et al., 2005; Sánchez-Monedero et al., 2006; Vélez-Pereira et al., 2010; Jonsson et al., 2014).

En cuanto a las concentraciones de las aerobacterias se analiza que estas son superiores durante la jornada de la mañana que en la tarde, lo cual se comprueba mediante el análisis estadístico de correlación de Spearman, en el cual se observa que a medida que aumenta la temperatura la concentración de aerobacterias aumenta; para el caso de la concentración de aerosoles fúngicos esta se ve favorecida por la disminución de la temperatura y el aumento de la humedad relativa.

8.2 Clasificación de los bioaerosoles

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por medio de la clasificación de bacterias, se comprueba que los bacilos son la morfología predominante, lo cual se confirma con un estudio realizado por Camargo et al. (2011) al reportar un total de 77.58% de bacilos. Así mismo, los bacilos se encuentran asociados a especies patógenas de gran importancia como lo son *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas fluorescens*, *Aeromonas salmonicida*, entre otras (Flores et al., 2007).

Los géneros de hongos identificados en el presente estudio son muy similares con otras investigaciones semejantes (Huang et al., 2002; Rodríguez et al., 2005; Flores et al., 2007; Burkowska et al., 2011; Camargo et al., 2011), en donde se ha reportado al *Penicillium* sp, *Aspergillus* sp y *Geotrichum* sp como los géneros predominantes, siendo en este caso el

primero el género más predominante con 38.36 %, seguido del *Aspergillus* sp con 30.80% y el *Geotrichum* sp con 17.34%; en dichos estudios las mayores concentraciones de estos géneros de hongos al igual que en la presente investigación se presentan en las piscinas de lixiviados, aunque también se reportan valores considerables en la celda activa. Para el caso del género *Aspergillus* sp se ha demostrado que este puede generar afectaciones al sistema respiratorio humano, generando de esta manera un alto riesgo para la salud pública (Schlosser et al., 2016).

8.3 Distribución espacio-temporal de la concentración de bioaerosoles

La distribución espacio-temporal de la concentración de los bioaerosoles (aerobacterias y hongos) indica que esta puede verse influenciada por condiciones meteorológicas como la humedad y la temperatura (Rosas et al., 2005; Vélez-Pereira & Camargo, 2009), tal como se evidencia mediante el análisis estadístico de correlación de Spearman dado que al incrementar la temperatura también aumentó la concentración de aerobacterias durante la jornada de la mañana y una vez aumentó la humedad y disminuyó la temperatura se obtuvo mayor concentración de aerosoles fúngicos durante la misma jornada.

Así mismo, las concentraciones de aerobacterias presentan cambios bruscos en distintas campañas y para ambas jornadas, lo cual puede atribuirse ya que la celda activa es la etapa de mayor movimiento mecánico del material orgánico y que podría favorecer la resuspensión de estos microorganismos (Gomes et al., 2007; Persson & Thaning, 2014).

En el caso de los aerosoles fúngicos, no se presentan cambios bruscos en las concentraciones, exceptuando en la campaña 1 durante la jornada de la mañana, posiblemente por acción del viento que predomina en dirección noreste y permitiría el arrastre de dichos microorganismos desde la celda activa hacia las piscinas de lixiviados y la celda pasiva 1.

9. Conclusiones

Las concentraciones de bioaerosoles reportadas en el relleno sanitario son mucho menores a las reportadas en otros rellenos sanitarios, no obstante las concentraciones tienden a aumentar en las estaciones donde hay movimiento mecánico como la celda activa y las piscinas de lixiviados.

Se reportó un promedio máximo de aerobacterias en la jornada de la mañana específicamente en la celda activa, lo cual pudo atribuirse a que es la estación que presenta mayor movimiento mecánico del material orgánico, propiciando de esta manera la resuspensión de las partículas biológicas con ayuda de la acción del viento. Por otra parte, el valor mínimo se registró en la celda pasiva, probablemente por el poco arrastre del material orgánico.

Se presentó mayor concentración de aerobacterias que de aerosoles fúngicos, situación acentuada en la jornada de la mañana posiblemente como un efecto de las condiciones ambientales en la viabilidad de los microorganismos, y que es confirmado por la relación directa que tiene la humedad y la relación indirecta que tiene la temperatura.

La estación con mayor reporte de aerobacterias es celda activa y la de aerosoles fúngicos es la ubicada entre las piscinas de lixiviados, esto es consistente con lo reportado en la literatura y se puede atribuir a los tipos de residuos o subproductos, y al movimiento mecánico que se tiene en estas zonas.

Las aerobacterias presentan una mayor deposición en la etapa 6 del impactador, mientras que los hongos en la etapa 4, esto genera una mayor preocupación por el riesgo a la salud debido a su potencial de penetración en el sistema respiratorio hasta los alveolos y bronquios secundarios respectivamente, lo cual podría provocar diversas enfermedades alérgicas e infecciosas en los trabajadores del relleno, además de poder ser transportadas a grandes distancias por bajas velocidades de viento.

Los hongos predominantes son el *Penicillium sp*, *Aspergillus sp* y *Geotrichum sp*, mientras que la morfología de las bacterias fueron los bacilos, organismos típicos de las etapas de tratamiento de residuos sólidos en rellenos sanitarios y que son importantes debido a su asociación con enfermedades respiratorias.

La distribución espacio-temporal de la concentración de los bioaerosoles (aerobacterias y hongos) indicó que esta puede verse influenciada por condiciones meteorológicas como la humedad y la temperatura, tal como se evidenció mediante el análisis estadístico de correlación de Spearman dado que al incrementar la temperatura también aumentó la concentración de aerobacterias durante la jornada de la mañana y una vez aumentó la humedad y disminuyó la temperatura se obtuvo mayor concentración de aerosoles fúngicos durante la misma jornada.

Finalmente, de acuerdo al análisis de varianza jerarquizado no se observó una variabilidad considerable entre las jornadas de la mañana y tarde en ninguna de las etapas del relleno sanitario. No obstante, se reportaron diferencias significativas con respecto a las estaciones del relleno sanitario, en donde la celda activa obtuvo mayor variabilidad.

10. Recomendaciones

Dado que no existen antecedentes de investigaciones desarrolladas en el área de estudio, se recomienda evaluar las concentraciones de bioaerosoles por un periodo superior a un año, con el fin de que dichos datos sean útiles al momento de implementar medidas de manejo para el control de bioaerosoles.

Además, debido a los resultados obtenidos mediante el impactador de cascada de 6 etapas, el cual permite discriminar las concentraciones de acuerdo a la cavidad del sistema respiratorio humano en el que podría alcanzar, se recomienda continuar los estudios con dicho equipo empleando el mismo caudal de aire.

En lo concerniente con los medios de cultivo, estos podrían ser preparados con agares selectivos, lo cual facilitará la identificación de las especies de aerosoles fúngicos y aerobacterias que pueden causar enfermedades respiratorias al ser humano.

Finalmente, es conveniente llevar a cabo investigaciones para la evaluación de bioaerosoles en ambientes relacionados, como estaciones depuradoras de aguas residuales, plantas de compostaje, entre otros, con el fin de realizar comparaciones de las concentraciones de estas partículas en distintos ambientes que pueden ser focos emisores relevantes en el departamento del Atlántico.

11. Bibliografía

- Achanzar, W. E., & Mangipudy, R. S. (2014). Aerosols A2 - Wexler, Philip. In *Encyclopedia of Toxicology* (Third Edition) (pp. 100–101). Oxford: Academic Press. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123864543002232>
- Adhikari, A., Sen, M.M., Gupta-Bhattacharya, S., & Chanda, S. (2004). Airborne viable, non-viable, and allergenic fungi in a rural agricultural area of India: a 2-year study at five outdoor sampling stations. *Science of the Total Environment*, 326, 123-141.
- Arciniegas, A., Rodríguez, C., Panchón, J., Sarmiento, H., & Hernandez, L. (2006). Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en una zona industrial de la ciudad de Bogotá. *Acta Nova*; Vol. 3, N°2.
- Arenas, R. (2011). *Micología médica ilustrada*. Mc Graw Hill, 4ta edición, pp. 10-11.
- Barlow, D.F. (1972). The effects of various protecting agents on the inactivation of foot-and-mouth disease virus in aerosols and during freeze-drying. *J. Gen. Virol.* 17:281– 288.
- Bauer, H., Fuerhackerb, M., Zibuschkab, F., Schmida, H., & Puxbaum, H. (2002). Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants. *Water Res.* 36 (16), 3965 – 3970.
- Baxi, S. N., Portnoy, J. M., Larenas-Linnemann, D., & Phipatanakul, W. (2016). Exposure and Health Effects of Fungi on Humans. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*. <http://doi.org/10.1016/j.jaip.2016.01.008>
- Bierman, J., Merk, H., Werhmann, W., Klimek, L. & Wasem, J. (2013). Allergic disorders of the respiratory tract – endings from a large patient sample in the German statutory health insurance system. *22 (6)* 366–73.
- Breza-Boruta, B. (2012). Bioaerosols of the municipal waste landfill site as a source of microbiological air pollution and health hazard. *Ecol. Chem. Eng. A* 19,851–862.
- Byeon, J.H., Park, C.W., Yoon, K.Y., Park, J.H., & Hwang, J. (2008). Size distributions of total airborne particles and bioaerosols in a municipal composting facility. *Bioresource Technology* 99, 5150-5154.
- Bünger, J., Schappler-Scheele, B., Hilgers, R., & Hallier, E. (2007). A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 80, 306–312.
- Burkowska, A., Swiontek-brzezinska, M., & Kalwasińska, A. (2011). Impact of the municipal landfill site on microbiological contamination of air. (In:) *Contemporary*

Problems of Management and Environmental Protection. Some aspects of environmental impact of waste dumps no 9 (Ed: Skibniewska K.A.), University of Warmia and Mazury in Olsztyn: Olsztyn, 71-87.

Bungartz, F. (2002). The chemistry of lichens: Emphasizing unique features a bit of history. Lecture for PLB 400 - Lichenology. Arizona State University. Natural History Collections. Arizona (Az) USA.

Cabelli, V.J. (1962). The rehydration of aerosolized bacteria: Compounds which enhance the survival of rehydrated *Pasteurella tularensis*. Technical Report 314.

Camargo, Y. (2011). Biofiltración: Tecnología Aplicada a Contaminantes Líquidos y Gaseosos. Memorias, Universidad del Magdalena, Grupo GIMSA.

Camargo, Y., Henao, D., & Vélez-Pereira, A.M. (2011). Emisiones Atmosféricas de origen biológico. Grupo de investigación Modelación de Sistemas Ambientales. Universidad del Magdalena.

CEPIS (2005). Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América Latina y el Caribe. Washington, D.C. En: www.bvsde.ops-oms.org/sde/opssde/bvsde.shtml (Verificado 13.03.036).

Cox, C.S. (1987). The Aerobiological Pathway of Microorganisms. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom.

Cox, C.S., & Wathes, C.M. (1995). Bioaerosols Handbook. Lewis Publishers, Boca Raton, Fla.

Cutnell, J.D., & Johnson, K.W. (1995). Physics. Third edition. John Wiley and Sons.

Denning, D.W., Pashley, C., Hartl, D., Wardlaw, A., Godet, C., Del Giacco, S., Delhaes, L., Sergejeva, S. (2014). Fungal allergy in asthma – state of the art and research needs. Clin. Transl. Allergy 4, 14.

Dutil, S., Meriaux, A., de Latremoille, M.-C., Lazure, L., Barbeau, J., & Duchaine, C. (2009). Measurement of airborne bacteria and endotoxin generated during dental cleaning. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 6(2), 121–130. <http://doi.org/10.1080/15459620802633957>

Elbert, W., Taylor, P.E., Andreae, M.O., & Poschl, U. (2007). Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions. Atmospheric Chemistry and Physics 7 (17): 4569–4588.

Eduard, W., Douwes, J., & Thorne, P. S. (2008). Bioaerosols. Bioaerosols Elsevier, 287-297.

Fang, Z., Ouyang, Z., Hu, L., Wang, X., Zheng, H., & Lin, X. (2005). Culturable airborne fungi in outdoor environments in Beijing, China. *Science of the Total Environment*. 350: 47-58.

Flores, F., Pardavé, L., & Valenzuela, I. (2007). Estudio aerobiológico de la zona aledaña al relleno sanitario “San Nicolás”, municipio de Aguascalientes. *Investigación y Ciencia* 15 (37): 13-18.

Frączek, K., Różycki, H., & Ropek, D. (2014). Statistical Analyses of Bioaerosol Concentration at Municipal Landfill Site. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 21(2), 229–243. <http://doi.org/10.2478/eces-2014-0018>

Gangamma, S. (2014). Characteristics of airborne bacteria in Mumbai urban environment. *Science of the Total Environment* 488–489; 70–74.

Ghosh, B., Lal, H., & Srivastava, A. (2015). Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms. *Environment International*, 85, 254–272. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.018>

Gibney, M.J. (2000). Predicting package defects: quantification of critical leak size. Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University.G

Gnanasekharan, V., & Floros, J.D. (1995). A theoretical perspective on the minimum leak size for package integrity evaluation. In Blakistone, B.A., & Harper, C.L. (eds.). *Plastic package integrity testing - assuring seal quality*. IOPP. Herndon, VA.

Gomes, C., Freihaut, J., & Bahnfleth, W. (2007). Resuspension of allergen-containing particles under mechanical and aerodynamic disturbances from human walking. *Atmospheric Environment*, 41(25), 5257–5270. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.061>

Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., & Marchand, G. (2001). Bioaerosols in the workplace: evaluation, control and prevention guide. IRSST.

Grisoli, P., Rodolfi, M., Villani, S., Grignani, E., Cottica, D., Berri, A., Picco, A.M., & Dacarro, C. (2009). Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant. *Environmental Research* 109, 135-142.

Guo, X., Wu, P., Ding, W., Zhang, W., & Li, L. (2014). Reduction and characterization of bioaerosols in a wastewater treatment station via ventilation. *Journal of Environmental Sciences* 26, 1575-1583.

Hatch, M. T., & Dimmick, R.L. (1966). Physiological responses of airborne bacteria to shifts in relative humidity. *Bacteriol. Rev.* 30: 597– 603.

- Heo, K. J., Kim, H. B., & Lee, B. U. (2014). Concentration of environmental fungal and bacterial bioaerosols during the monsoon season. *Journal of Aerosol Science*, 77, 31–37. <http://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2014.07.001>
- Heo, Y., Park, J., Lim, S. I., Hur, H. G., Kim, D., Park, K. (2010). Size-resolved culturable airborne bacteria sampled in rice field, sanitary landfill, and waste incineration sites. *Journal of Environmental Monitoring*, 12, 1619-1624.
- Huang, C.Y., Lee, C.C., Li, F.C., Ma, Y.P., Su, H.Y. (2002). The seasonal distribution of bioaerosols in municipal landfill sites: a 3-yr study. *Atmospheric Environment*, 36, 4385–4395.
- Hurst, C., Garland, J., & Mills, A. (2007). *Manual of Environmental Microbiology* (3rd Edition). ASM Press. pp. 961-989.
- Hurtado, L., Rodriguez, G., López, J., Castillo, J.E., Molina, L., Zavala, M., & Quintana, P. (2014). Characterization of atmospheric bioaerosols at 9 sites in Tijuana, Mexico. *Atmospheric Environment* 96, 430 – 436.
- Hwang, G.B., Jung, J.H., Jeong, T.G., & Lee, B.U. (2010). Effect of hybrid UV-thermal energy stimuli on inactivation of *S. epidermidis* and *B. subtilis* bacterial bioaerosols. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5903–5909.
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá, D.C. Págs. 1-219.
- IDEAM & UPME. (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Bogotá, D.C. Págs. 1-169.
- INSHT. (1996). Contaminantes biológicos: criterios de valoración. Nota Técnica de Prevención NTP-409/1996. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT.). Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España.
- Israelí, E., Gitelman, J., & Lighthart, B. (1994). Death mechanisms in bioaerosols, p. 166–191. In B. Lighthart and A. J. Mohr, (ed.), *Atmospheric Microbial Aerosols*. Chapman & Hall, New York.
- Izzeddin, A., Medina, T., & Rojas, F. (2011). Evaluación de bioaerosoles en ambientes de centros de salud de la ciudad de Valencia, Venezuela. *Revista Kasmera*, 39 (1), 59-67.
- Jo, W.K., & Seo, Y.J. (2005). Indoor and outdoor bioaerosol levels at recreation facilities, elementary schools, and homes. *Chemosphere* 61, 1570-1579.
- Jonsson, P., Olofsson, G., & Torbjörn, T. (2014). *Bioaerosol Detection Technologies*. Springer http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-5582-1_3

- Kalwasińska, A., & Burkowska, A. (2013). Municipal landfill sites as sources of microorganisms potentially pathogenic to humans. *Environmental Science. Processes & Impacts*, 15(5), 1078–1086. <http://doi.org/10.1039/c3em30728j>
- Karra, S., & Katsivela, E. (2007). Microorganisms in bioaerosols emissions from wastewater treatment plants during summer at Mediterranean site. *Water Res.* 41 (6), 1355 – 1365.
- Kaźmierczuk, M., & Bojanowicz-Bablok, A. (2014). Bioaerosol concentration in the air surrounding municipal solid waste landfill. *Ochrona Środowiska I Zasobów Naturalnych - Environmental Protection and Natural Resources*, 25(2), 17–25. <http://doi.org/10.2478/oszn-2014-0015>
- Kobayashi, F., Maki, T., Kakikawa, M., Noda, T., Mitamura, H., Takahashi, A., Imura, S. & Iwasaka, Y. (2015). Atmospheric bioaerosols originating from Adelie penguins (*Pygoscelis adeliae*): Ecological observations of airborne bacteria at Hukuro Cove, Langhovde, Antarctica. *Polar Science* 1-8. <http://ees.elsevier.com/polar>.
- Korzeniewska, E., Filipkowska, Z., Gotkowska-Plachta, A., Janczukowicz, W., Dixon, B., & Czulowska, M. (2009). Determination of emitted airborne microorganisms from a BIO-PAK wastewater treatment plant. *Water Research* (43): 2841-2851.
- Kummer, V., & Thiel, W.R. (2008). Bioaerosols – Sources and control measures. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 211 (3-4), 299-307.
- Lee, J., & Jo, W. (2006). Characteristics of indoor and outdoor bioaerosols at Korean high-rise apartment buildings. *Environmental Research* 101, 11-17.
- Lenis, V., López, Y.L., & Correa, E. (2013). Aerotransportables biológicos asociados al relleno sanitario La Pradera, Antioquia (Colombia), 2010-2012. En: *memorias del IV Congreso Colombiano de Calidad del Aire y Salud Pública*. Pág. 562.
- Li, J., Zhou, L., Zhang, X., Xu, C., Dong, L., & Yao, M. (2015). Bioaerosol emissions and detection of airborne antibiotic resistance genes from a wastewater treatment plant. *Atmospheric Environment*, 1-9.
- Li, L., Gao, M., & Liu, J. (2011). Distribution characterization of microbial aerosols emitted from a wastewater treatment plant using the Orbal oxidation ditch process. *Process Biochemistry* 46, 910-915.
- Löndahl, J. (2014). Physical and Biological Properties of Bioaerosols. *Bioaerosol Detection Technologies*. Pag 33-48: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-5582-1_3
- Maier, R.M., Pepper, I.L., & Gerba, C.P. (2000). *Environmental Microbiology*. Academic Press, San Diego, CA.

Malmros, P. (1990). Problems with the working environment in the solid waste treatment. The National Labour Inspection of Denmark, report #10/1990.

Malecka-Adamowicz, M., Kaczanowska, J., Donderski, W. (2007). The impact of a landfill site in Zolwin-Wypaleniska on the microbiological quality of air. *Pol. J. Environ. Stud.* 16, 101–107.

Mandal, J., & Brandl, H. (2011). Bioaerosols in Indoor Environment - A review with Special Reference to Residential and Occupational Locations. *The Open Environmental & Biological Monitoring Journal*, 83-96.

Miller, P.A., & Clesceri, N.L. (2002). *Waste Sites as Biological Reactors: Characterization and Modellnig*. CRC Press, Boca Raton.

Ministerio del Medio Ambiente. (2002). *Guía ambiental de rellenos sanitarios*. Colombia: Programa, Fortalecimiento Institucional para la Gestión Ambiental Urbana – FIGAU.

Mirón, A. (2011). Riesgo biológico: prevención en mataderos. Instituto Nacional e Higiene en el trabajo. *Notas técnicas de prevención* 901.

Mohr, A.J. (2002). Fate and transport of microorganisms in air. En: “Manual of Environmental Microbiology”, 2nd Edition (Ed: C.J. Hurst). ASM Press, Washington, 827-838.

Mosso, M.A., Ullán, C., & Rosa, M.C. (2002). El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos. *Observatorio Medioambiental*, (5), 375–402.

Murray, P., Rosenthal, K., & Pfaller, M. (2009). *Microbiología médica*. 6ta edición.

Pankhurst, L.J., Akeel, U., Hewson, C., Maduka, I., Pham, P., Saragossi, J., Taylor, J., & Lai, K.M. (2011). Understanding and mitigating the challenge of bioaerosol emissions from urban community composting. *Atmospheric Environment* 45, 85 – 93.

Pascual, L., Pérez-Luz, S., Yáñez, M.A., Santamaría, A., Gibert, K., Salgot, M. (2003). Bioaerosol emission from wastewater treatment plants. *Aerobiología* 19, 261 - 270.

Pepper, I. L., & Dowd, S. E. (2009). Chapter 5 - Aeromicrobiology A2 - Gerba, Raina M. MaierIan L. PepperCharles P. In *Environmental Microbiology* (Second Edition) (pp. 83–102). San Diego: Academic Press. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123705198000055>

Pepper, I. L., & Gerba, C. P. (2015). Chapter 5 - Aeromicrobiology. In *Environmental Microbiology* (Third edition) (pp. 89–110). San Diego: Academic Press. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123946263000053>

Persson, L., & Thaning, L. (2014). Dispersion in the Atmosphere. In P. Jonsson, G. Olofsson, & T. Tjärnhage (Eds.), *Bioaerosol Detection Technologies* (pp. 49–62). Springer New York. Retrieved from http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-5582-1_4

Pham, T.-D., & Lee, B.-K. (2016). Advanced removal of *C. famata* in bioaerosols by simultaneous adsorption and photocatalytic oxidation of Cu-doped TiO₂/PU under visible irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 286, 377–386. <http://doi.org/10.1016/j.cej.2015.10.100>

Poulsen, O.M., Breum N.O., & Ebbeløj, N. (1995). Collection of domestic waste. Review of Occupational Health Problems and their possible causes. *Science of the Total Environment*, 170 (1).

Prats, G. (2006). *Microbiología clínica*. Editorial Médica Panamericana. pp. 85-89.

Prescott, L., Harley, J., & Klein, D. (2004). *Microbiología*. McGraw-Hill Interamericana, pp. 974-983.

Ranalli, G., Principi, P., & Sorlini, S. (2000). Bacterial aerosol emission from wastewater treatment plants: culture methods and bio-molecular tools. *Aerobiología* 16: 39-46.

Rey, F.J., & Velasco, E. (2007). *Calidad de ambientes interiores*. Editorial Paraninfo, pp. 41-43.

Rodríguez, G.S., Sauri, R.M., Peniche, A.I., Pacheco, A.J., & Ramírez, H.J. (2005). Dispersión de materiales aerotransportables viables en el área de tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales de Mérida, Yucatán. *Ingeniería* 9 (3): 19-29.

Rodríguez, J. A., González, J., Magarolas, R., & Martínez, C. (2011). El aire es nuestro: la importancia de mantener su calidad. *Arch Bronconeumol*; 47(Supl 1):23-26

Roodbari, A., Naddafi, K., & Javid, A. (2013). Measurements of bioaerosols in the air around the facilities of waste collection and disposal. *Environment Protection Engineering* Vol. 39 No. 4, DOI: 10.5277/epe130409.

Rosas, I., Salinas, E., Martínez, L., Eslava, C., & Cravioto, A. (2004). *Microbiología ambiental*. Primera edición. México: Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT); p. 18.

Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Cayuela, M.L. & Stentiford, E.I. (2006). Emisión de bioaerosoles asociada a la gestión de residuos sólidos. *Revista Ingeniería*. Vol. 10, No. 1; p. 39-47.

Sánchez-Monedero, M.A., Aguilar, M.I., Fenoll, R. & Roig, R. (2007). Generación de bioaerosoles en estaciones depuradoras de aguas residuales. *Ingeniería* 11-1, 37-42

Santos, J., González, C., Barreto, A., & Rojas, A. (2011). Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia- Diagnóstico 2011. Secretaría General Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios – SSPD.

Sattler, B., Puxbaum, H., & Psenner, R. (2001). Bacterial growth in supercooled cloud droplets. *Geophysical Research Letters*, 28(2), 239–242.

Sharma, P.D. (2007). *Microbiology*. Meerut, IND: Rastogi Publications; p. 231-232.

Schlosser, O., Déportes, I.Z., Facon B., & Fromont, E. (2015). Extension of the sorting instructions for household plastic packaging and changes in exposure to bioaerosols at materials recovery facilities. *Waste Management* 44-55. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X15003736>

Schlosser, O., Robert, S., & Debeaupius, C. (2016). *Aspergillus fumigatus* and mesophilic moulds in air in the surrounding environment downwind of non-hazardous waste landfill sites. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*.

Srikanth, P., Sudharsanam, S., & Steinberg, R. (2008). Bio-Aerosols In Indoor Environment: Composition, Health Effects And Analysis. *Indian Journal of Medical Microbiology*, 302-312.

Solans, X., María Alonso, R., Constans, A., & Mansilla, A. (2007). Exposición laboral a hongos y bacterias ambientales en una planta de selección de residuos de envases. *Revista Iberoamericana de Micología*, 24(2), 131–135. [http://doi.org/10.1016/S1130-1406\(07\)70028-1](http://doi.org/10.1016/S1130-1406(07)70028-1)

Stellacci, P., Liberti, L., Notamicola, M., & Haas, C.N. (2010). Hygienic sustainability of site location of wastewater treatment plants: a case study. II. Estimating airborne biological hazard. *Desalination* 253 (1-3), 106 – 111.

Stetzenbach, L. D. (2002). Introduction to aerobiology. En: “Manual of Environmental Microbiology”, 2nd Edition (Ed: C.J. Hurst). ASM Press, Washington, 801-813.

Stetzenbach, L. D., Buttner, M., & Cruz, P. (2004). Detection and enumeration of airborne biocontaminants. *Current Opinion in Biotechnology - Environmental Biotechnology* – Elsevier, 170-174.

Sykes, P., Jones, K., & Wildsmith, J. D. (2007). Managing the potential public health risks from bioaerosol liberation at commercial composting sites in the UK: An analysis of the evidence base. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 410–424. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.05.005>

Taha, M. P. M., Drew, G. H., Tamer, A., Hewings, G., Jordinson, G. M., Longhurst, P. J., & Pollard, S. J. T. (2007). Improving bioaerosol exposure assessments of composting facilities — Comparative modelling of emissions from different compost ages and

processing activities. *Atmospheric Environment*, 41(21), 4504–4519. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.056>

Tamer Vestlund, A., Al-Ashaab, R., Tyrrel, S. F., Longhurst, P. J., Pollard, S. J. T., & Drew, G. H. (2014). Morphological classification of bioaerosols from composting using scanning electron microscopy. *Waste Management*, 34(7), 1101–1108. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.021>

Tyler, N., Acevedo, J., Bocarejo, J., Velásquez, J. (2013). Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. University College London – Universidad de los Andes.

Uk Lee, B., Lee, G., & Joon Heo, K. (2016). Concentration of culturable bioaerosols during winter. *Journal of Aerosol Science*, 94, 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.12.002>

Valenzuela, C. (1995). Química general: introducción a la química teórica. Universidad de Salamanca, p. 337.

Valsan, A. E., Priyamvada, H., Ravikrishna, R., Després, V. R., Biju, C. V., Sahu, L. K., ... Gunthe, S. S. (2015). Morphological characteristics of bioaerosols from contrasting locations in southern tropical India – A case study. *Atmospheric Environment*, 122, 321–331. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.071>

Vélez-Pereira, A. (2008). Evaluación de las partículas viables biológicas emitidas desde el Relleno Sanitario Palangana del Distrito de Santa Marta, Colombia, Tesis de Grado, Universidad del Magdalena. Santa Marta.

Vélez-Pereira, A., & Camargo, Y. (2014). Aerobacterias en las unidades de cuidado intensivo del Hospital Universitario "Fernando Troconis", Colombia. (Spanish). *Revista Cubana De Salud Pública*, 40(3), 362-368.

Vélez-Pereira, A. & Camargo, Y. (2009). Evaluación de la concentración de bioaerosoles fungí asociados al relleno sanitario Palangana, Santa Marta Colombia. Grupo de Investigación en Modelación de Sistemas Ambientales-GIMSA. Instituto de Investigaciones Tropicales INTROPIC. Universidad del Magdalena.

Vélez-Pereira, A., Camargo, Y., & Balaguera, S.R. (2010). Distribución espacio-temporal de aerobacterias en el relleno sanitario Palangana, Santa Marta (Colombia). *Revista Intropica* (5): 7-18.

Vilata, J.J. (2006). Micosis cutáneas. Editorial Médica Panamericana.

Walser, S.M., Gerstner, D.G., Brenner, B., Bünger, J., Eikmann, T., Janssen, B. Herr, C.E. W. (2015). Evaluation of exposure–response relationships for health effects of microbial bioaerosols – A systematic review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 218(7), 577–589. <http://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.07.004>

- Warren, J.C., Akers, T.G., & Dubovi, E.J. (1969). Effect of prehumidification on sampling of selected airborne viruses. *Appl. Microbiol.* 18: 893– 896.
- Webb, S. J. (1959). Factors affecting the viability of airborne bacteria. I. Bacteria aerosolized from distilled water. *Can. J. Microbiol.* 5: 649– 669.
- Webb, S. J. (1960). Factors affecting the viability of air-borne bacteria. III. The role of bonded water and protein structure in the death of air-borne cells. *Can. J. Microbiol.* 6: 89– 105.
- Webb, S. J. (1965). *The Role of Bound Water in the Maintenance of the Integrity of a Cell or Virus*. Charles C Thomas, Publisher, Springfield, III.
- Wei, K., Zou, Z., Zheng, Y., Li, J., Shen, F., Wu, C., ... Yao, M. (2016). Ambient bioaerosol particle dynamics observed during haze and sunny days in Beijing. *Science of The Total Environment*, 550, 751–759. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.137>
- Yao, M & Mainelis, G.(2007). Analysis of Portable Impactor Performance for Enumeration of Viable Bioaerosols. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4: 514–524

12. Anexos

ANEXO 1

COMPROBACIÓN DE SUPUESTOS PARA LAS CONCENTRACIONES DE AEROBACTERIAS

Los datos fueron analizados con el gestor de diseño Design Expert® y Statgraphics®, teniendo en cuenta el tipo de experimento y los rangos de los factores de diseño. Una muestra de la entrada de datos se expone a continuación:

Factor	Name	Units	Type	Low Actual	High Actual	Low Coded	High Coded	Mean	Std. Dev.
A	Temperatura	C	Numeric	26.92	36.62	-1.000	1.000	31.335	2.504
B	Humedad	%	Numeric	52.70	91.02	-1.000	1.000	70.742	10.659
C	Velocidad Viento Km/h		Numeric	0.000	6.30	-1.000	1.000	2.332	1.482
D	Estación		Categoric	Estación 1	Estación 4			Levels:	4
E	Jornada		Categoric	Mañana	Tarde			Levels:	2
F	Campaña		Categoric	Campaña 1	Campaña 6			Levels:	6

Std	Run	Block	Factor 1 A: Temperatura C	Factor 2 B: Humedad %	Factor 3 C: Velocidad V Km/h	Factor 4 D: Estación	Factor 5 E: Jornada	Factor 6 F: Campaña	Response 1 Concentración %
1	1	Block 1	28.92	76.35	4.98	Estación 1	Mañana	Campaña 1	1038.87
2	2	Block 1	28.98	75.23	4.20	Estación 1	Mañana	Campaña 1	643.11
3	3	Block 1	29.40	73.95	4.83	Estación 1	Mañana	Campaña 1	947
4	4	Block 1	28.97	73.70	2.55	Estación 1	Mañana	Campaña 2	360.42
5	5	Block 1	28.83	74.22	3.05	Estación 1	Mañana	Campaña 2	254.42
6	6	Block 1	29.87	71.23	2.18	Estación 1	Mañana	Campaña 2	367.49
7	7	Block 1	29.98	74.88	2.30	Estación 1	Mañana	Campaña 3	183.75
8	8	Block 1	30.28	73.27	1.92	Estación 1	Mañana	Campaña 3	325.09
9	9	Block 1	30.57	73.22	1.55	Estación 1	Mañana	Campaña 3	204.95
10	10	Block 1	27.62	89.25	0.98	Estación 1	Mañana	Campaña 4	247.35
11	11	Block 1	27.73	88.88	1.40	Estación 1	Mañana	Campaña 4	593.64
12	12	Block 1	27.78	88.95	1.98	Estación 1	Mañana	Campaña 4	459.36
13	13	Block 1	31.22	81.70	1.82	Estación 1	Mañana	Campaña 5	190.81
14	14	Block 1	30.87	81.37	1.65	Estación 1	Mañana	Campaña 5	77.74
15	15	Block 1	31.37	79.53	0.97	Estación 1	Mañana	Campaña 5	98.94
16	16	Block 1	27.62	89.25	0.98	Estación 1	Mañana	Campaña 6	374.56
17	17	Block 1	27.73	88.88	1.40	Estación 1	Mañana	Campaña 6	127.21
18	18	Block 1	27.78	88.95	1.98	Estación 1	Mañana	Campaña 6	381.63
19	19	Block 1	33.53	60.10	3.40	Estación 1	Tarde	Campaña 1	254.42
20	20	Block 1	33.72	59.95	3.53	Estación 1	Tarde	Campaña 1	296.82
21	21	Block 1	33.96	58.52	2.86	Estación 1	Tarde	Campaña 1	49.47
22	22	Block 1	34.65	54.75	3.93	Estación 1	Tarde	Campaña 2	487.63
23	23	Block 1	34.23	55.18	4.70	Estación 1	Tarde	Campaña 2	897.53
24	24	Block 1	33.48	57.77	2.28	Estación 1	Tarde	Campaña 2	572.44
25	25	Block 1	28.17	78.27	1.83	Estación 1	Tarde	Campaña 3	176.68

Con ayuda de ambos software se pudo evaluar el modelo más apropiado para evaluar la significancia de las variables y sus interacciones.

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	1.583E+007	1	1.583E+007			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>2.956E+006</u>	<u>12</u>	<u>2.463E+005</u>	<u>9.08</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
<u>2FI vs Linear</u>	<u>2.259E+006</u>	<u>53</u>	<u>42616.47</u>	<u>2.63</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic vs 2FI	26381.96	3	8793.99	0.53	0.6612	
Cubic vs Quadra	1.188E+006	72	16503.11			Aliased
Residual	0.000	0				
Total	2.226E+007	141	1.579E+005			

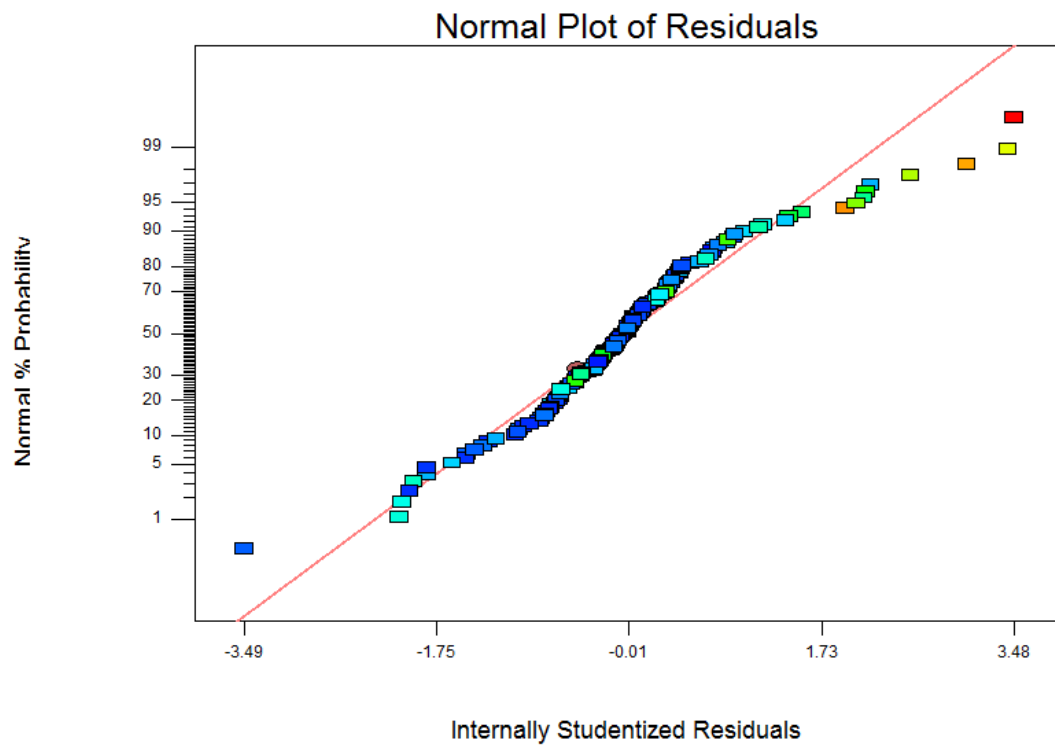
El resultado indica que el modelo de interacción de segundo orden resulta ser el recomendado. Con esta información se realiza el análisis de varianza (ANOVA) para cada una de las variables y sus respectivas interacciones.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	5.215E+006	65	80226.97	4.95	< 0.0001	significant
<i>D-Estación</i>	1.414E+005	3	47144.60	2.91	0.0399	
<i>E-Jornada</i>	442.36	1	442.36	0.027	0.8692	
<i>F-Campaña</i>	1.375E+006	5	2.749E+005	16.98	< 0.0001	
<i>DE</i>	9347.80	3	3115.93	0.19	0.9013	
<i>DF</i>	3.690E+005	15	24602.75	1.52	0.1200	
<i>EF</i>	98508.53	5	19701.71	1.22	0.3097	
Residual	1.215E+006	75	16194.74			

El resumen del análisis de varianzas es que las variables significativas son la campaña y la estación. Así mismo, se procedió a probar los supuestos del análisis de varianza.

1. Normalidad

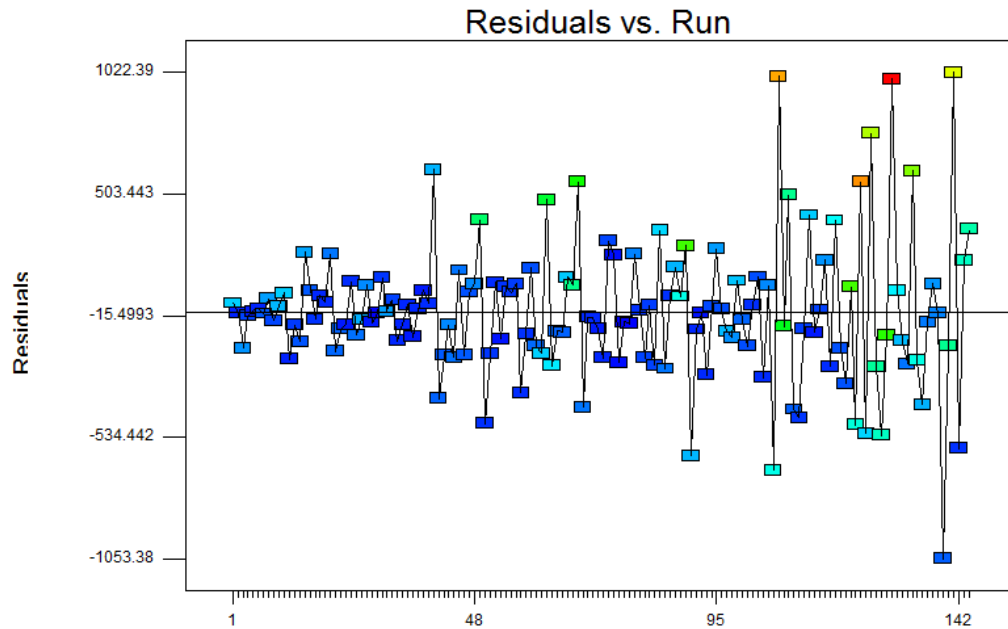
El supuesto de normalidad tiene una prueba inicial que es una gráfica de la probabilidad normal de los residuales. Los residuales distribuidos en forma de línea recta constituyen una concordancia con el supuesto de normalidad.



El gráfico no genera sospechas de incumplimiento de la normalidad. Sin embargo, fue realizada también una prueba formal introduciendo los residuos en un programa de análisis de experimentos (Statgraphics Centurion XVI), la prueba fue la del estadístico de Shapiro-Wilks con un resultado de 0.063. Debido a que el p-value es mayor a 0.05, se concluye que los datos se distribuyen normalmente.

Independencia

La forma de verificar independencia es que no se aprecien patrones al graficar los residuos con respecto a las corridas.



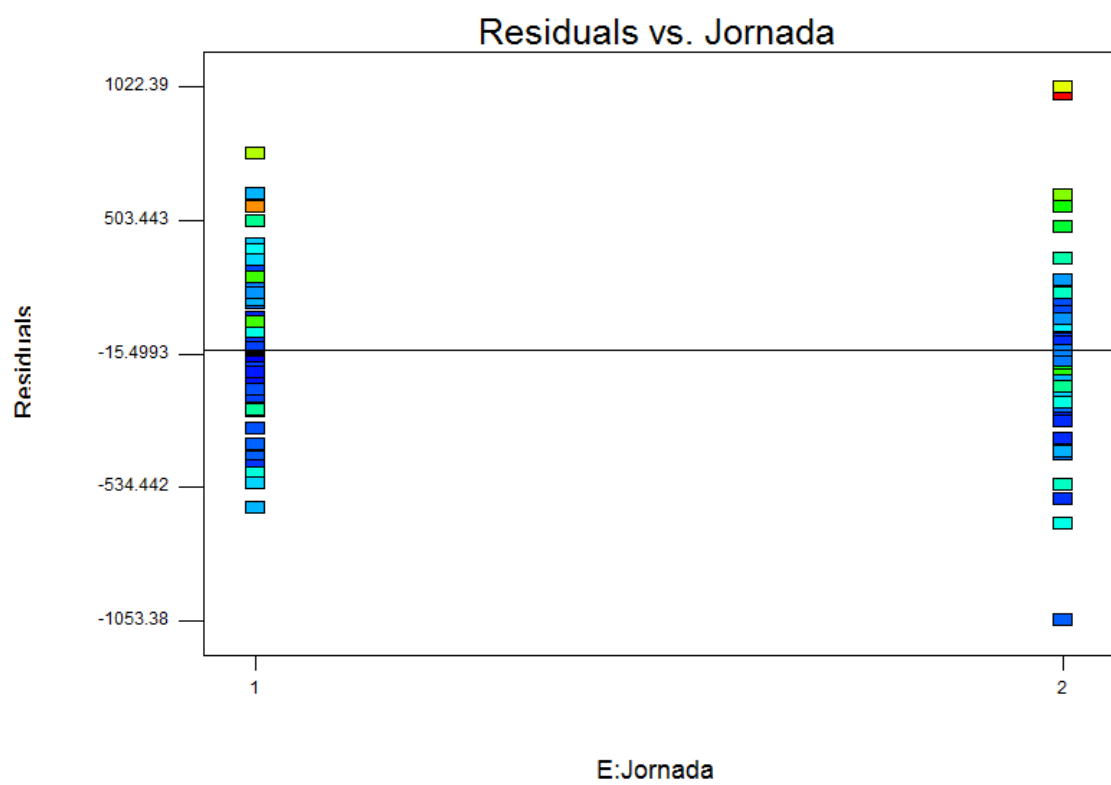
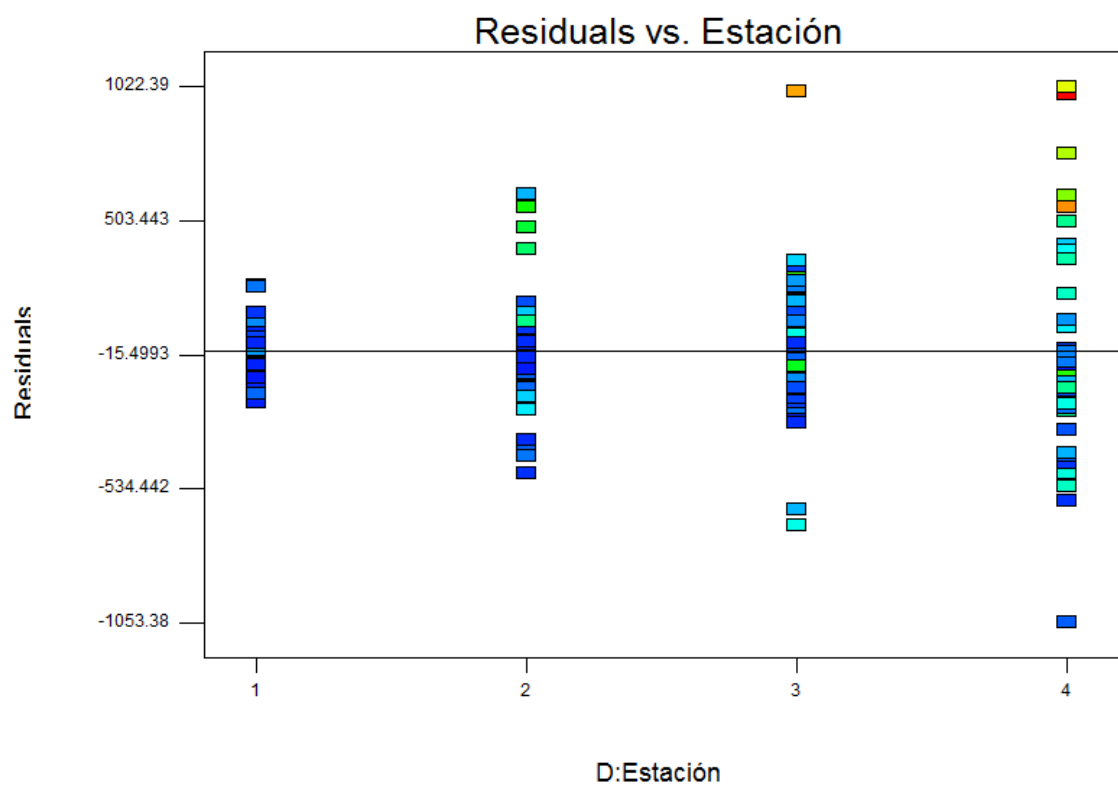
El valor de la auto-correlación de retraso 1, es de 0.02, como regla general se tiene que existen problemas de independencia si ese valor es mayor que $1/\sqrt{N}$ donde N es el número total de datos, en este caso:

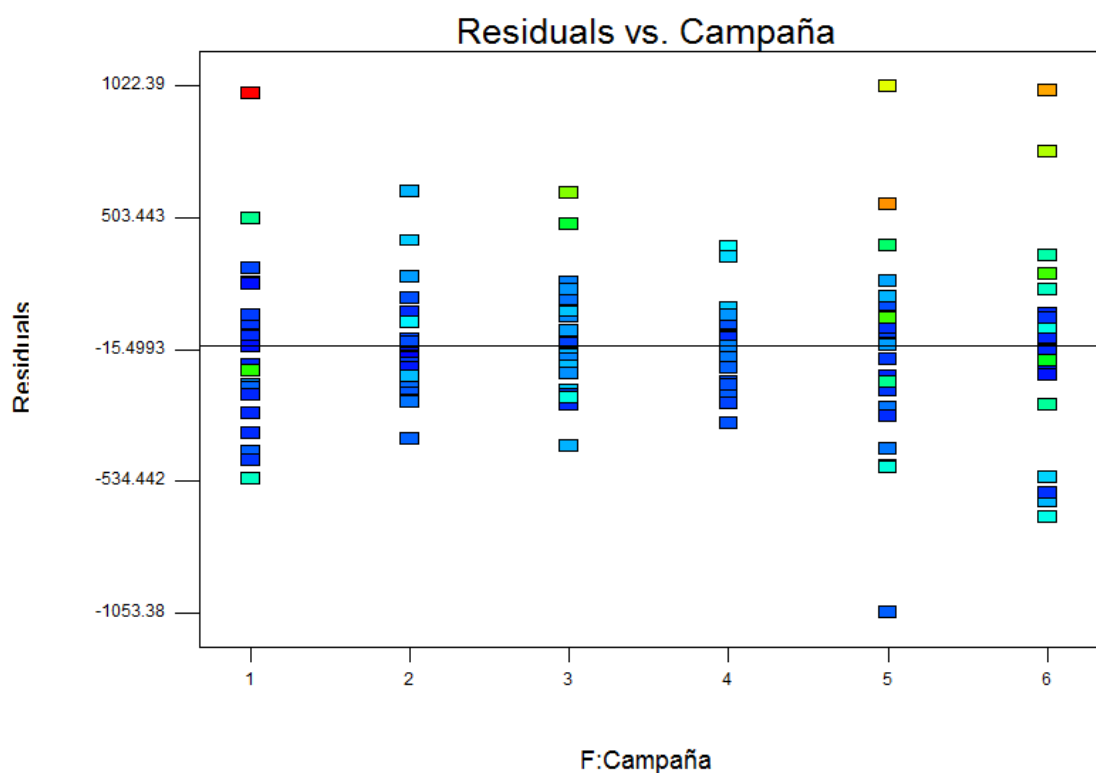
$$\frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{144}} = 0.083$$

Debido a que no es mayor se puede concluir que no existen problemas de independencia.

❖ Homocedasticidad

La verificación inicial de homocedasticidad se realiza con la gráfica de los residuos por nivel de los factores.





De todas las gráficas de sospechas la única que generó preocupación fue la de estación, puesto que la forma más común de violación del supuesto de homocedasticidad es un cono cóncavo o convexo con respecto al origen. Se procedió entonces a realizar una prueba formal para comprobar el supuesto de igualdad de varianzas.

Dado que no existen dudas con respecto al supuesto de homocedasticidad se procedió a realizar la prueba Bartlett, los resultados se muestran a continuación:

S_p^2	0,141
q	6,951
c	1,093
X_o^2	14,647
X_{crit}^2	26,296
$P\text{-Value}$	0,551
CONCL.	Homo.

La prueba formal muestra que no existen problemas de homocedasticidad para este factor.

ANEXO 2

COMPROBACIÓN DE SUPUESTOS PARA LAS CONCENTRACIONES DE AEROSOLES FUNGÍ

Los datos fueron analizados con el gestor de diseño Design Expert® y Statgraphics®, teniendo en cuenta el tipo de experimento y los rangos de los factores de diseño. Una muestra de la entrada de datos se expone a continuación:

Factor	Name	Units	Type	Low Actual	High Actual	Low Coded	High Coded	Mean	Std. Dev.
A	Temperatura	C	Numeric	26.73	37.78	-1.000	1.000	31.463	2.579
B	Humedad	%	Numeric	50.22	91.93	-1.000	1.000	70.478	10.556
C	Velocidad Viento	Km/h	Numeric	0.000	6.37	-1.000	1.000	2.398	1.375
D	Estación		Categoric	Estación 1	Estación 4			Levels:	4
E	Jornada		Categoric	Mañana	Tarde			Levels:	2
F	Campaña		Categoric	Campaña 1	Campaña 6			Levels:	6

Notes for Análisis Histórico	Std	Run	Block	Factor 1 A: Temperatura C	Factor 2 B: Humedad %	Factor 3 C: Velocidad V Km/h	Factor 4 D: Estación	Factor 5 E: Jornada	Factor 6 F: Campaña	Response 1 Concentración %
Design (Actual)	1	1	Block 1	28.92	76.35	4.98	Estación 1	Mañana	Campaña 1	1038.87
Summary	2	2	Block 1	28.98	75.23	4.20	Estación 1	Mañana	Campaña 1	643.11
Graph Columns	3	3	Block 1	29.40	73.95	4.83	Estación 1	Mañana	Campaña 1	947
Evaluation	4	4	Block 1	28.97	73.70	2.55	Estación 1	Mañana	Campaña 2	360.42
Analysis	5	5	Block 1	28.83	74.22	3.05	Estación 1	Mañana	Campaña 2	254.42
Concentración (Ana	6	6	Block 1	29.87	71.23	2.18	Estación 1	Mañana	Campaña 2	367.49
Optimization	7	7	Block 1	29.98	74.88	2.30	Estación 1	Mañana	Campaña 3	183.75
Numerical	8	8	Block 1	30.28	73.27	1.92	Estación 1	Mañana	Campaña 3	325.09
Graphical	9	9	Block 1	30.57	73.22	1.55	Estación 1	Mañana	Campaña 3	204.95
Point Prediction	10	10	Block 1	27.62	89.25	0.98	Estación 1	Mañana	Campaña 4	247.35
	11	11	Block 1	27.73	88.88	1.40	Estación 1	Mañana	Campaña 4	593.64
	12	12	Block 1	27.78	88.95	1.98	Estación 1	Mañana	Campaña 4	459.36
	13	13	Block 1	31.22	81.70	1.82	Estación 1	Mañana	Campaña 5	190.81
	14	14	Block 1	30.87	81.37	1.65	Estación 1	Mañana	Campaña 5	77.74
	15	15	Block 1	31.37	79.53	0.97	Estación 1	Mañana	Campaña 5	98.94
	16	16	Block 1	27.62	89.25	0.98	Estación 1	Mañana	Campaña 6	374.56
	17	17	Block 1	27.73	88.88	1.40	Estación 1	Mañana	Campaña 6	127.21
	18	18	Block 1	27.78	88.95	1.98	Estación 1	Mañana	Campaña 6	381.63
	19	19	Block 1	33.53	60.10	3.40	Estación 1	Tarde	Campaña 1	254.42
	20	20	Block 1	33.72	59.95	3.53	Estación 1	Tarde	Campaña 1	296.82
	21	21	Block 1	33.96	58.52	2.86	Estación 1	Tarde	Campaña 1	49.47
	22	22	Block 1	34.65	54.75	3.93	Estación 1	Tarde	Campaña 2	487.63
	23	23	Block 1	34.23	55.18	4.70	Estación 1	Tarde	Campaña 2	897.53
	24	24	Block 1	33.48	57.77	2.28	Estación 1	Tarde	Campaña 2	572.44
	25	25	Block 1	28.17	78.27	1.83	Estación 1	Tarde	Campaña 3	176.68

Con ayuda del programa se pudo evaluar el modelo más apropiado para evaluar la significancia de las variables y sus interacciones.

Sequential Model Sum of Squares [Type I]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Mean vs Total	1.583E+007	1	1.583E+007			
<u>Linear vs Mean</u>	<u>2.956E+006</u>	<u>12</u>	<u>2.463E+005</u>	<u>9.08</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
<u>2FI vs Linear</u>	<u>2.259E+006</u>	<u>53</u>	<u>42616.47</u>	<u>2.63</u>	<u>< 0.0001</u>	<u>Suggested</u>
Quadratic vs 2FI	26381.96	3	8793.99	0.53	0.6612	
Cubic vs Quadra	1.188E+006	72	16503.11			Aliased
Residual	0.000	0				
Total	2.226E+007	141	1.579E+005			

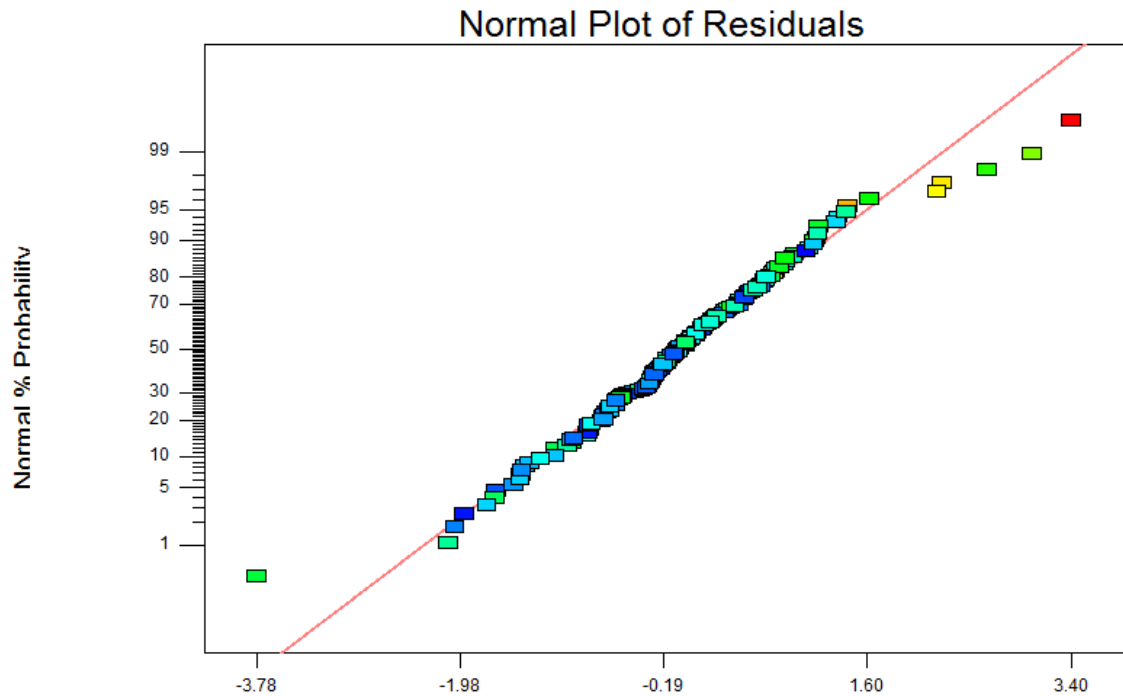
El resultado es que el modelo de interacción de segundo orden resulta ser el recomendado. Con esta información se realiza el análisis de varianza (ANOVA) para cada una de las variables y sus respectivas interacciones.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	5.215E+006	65	80226.97	4.95	< 0.0001	significant
<i>D-Estación</i>	1.414E+005	3	47144.60	2.91	0.0399	
<i>E-Jornada</i>	442.36	1	442.36	0.027	0.8692	
<i>F-Campaña</i>	1.375E+006	5	2.749E+005	16.98	< 0.0001	
<i>DE</i>	9347.80	3	3115.93	0.19	0.9013	
<i>DF</i>	3.690E+005	15	24602.75	1.52	0.1200	
<i>EF</i>	98508.53	5	19701.71	1.22	0.3097	
Residual	1.215E+006	75	16194.74			

El resumen del análisis de varianzas indicó que las variables significativas fueron la campaña y la estación. Se procedió a probar los supuestos del análisis de varianza.

❖ Normalidad

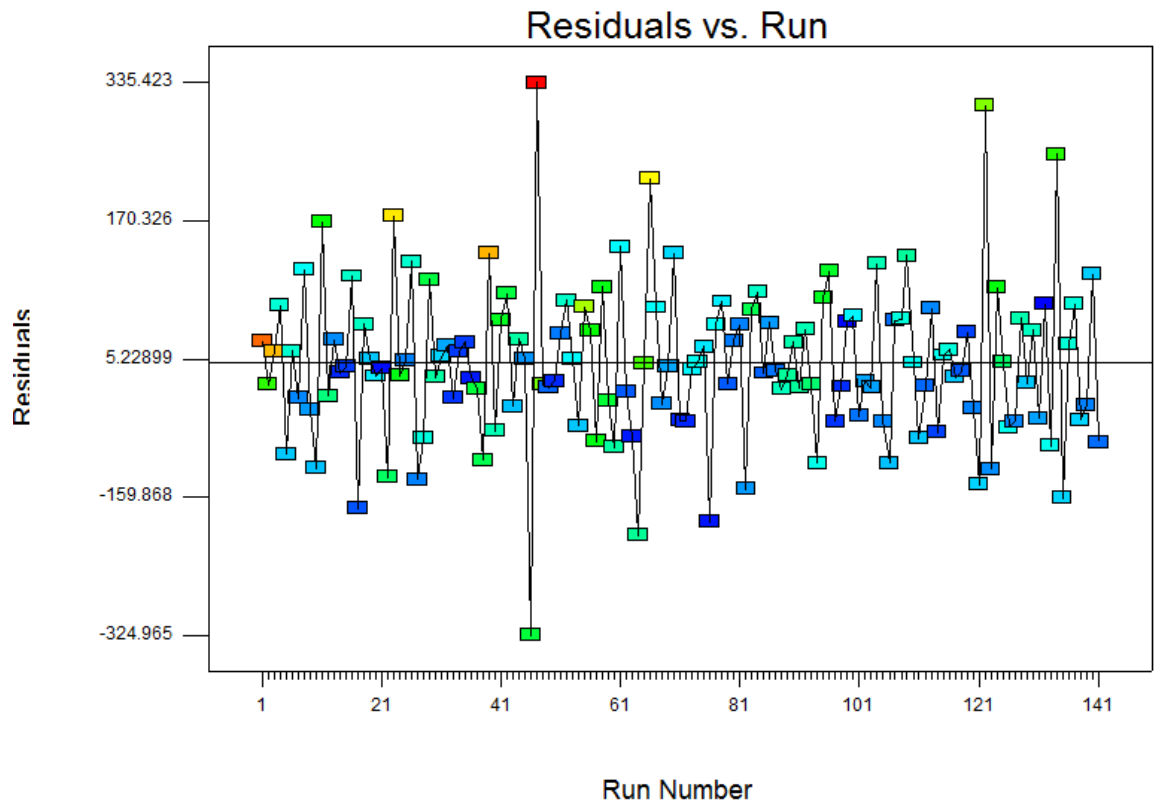
El supuesto de normalidad tiene una prueba inicial que es una gráfica de la probabilidad normal de los residuales. Los residuales distribuidos en forma de línea recta constituyen una concordancia con el supuesto de normalidad.



El gráfico no genera sospechas de incumplimiento de la normalidad. Sin embargo, fue realizada también una prueba formal introduciendo los residuos en un programa de análisis de experimentos (Statgraphics Centurion VXi), la prueba fue la del estadístico de Shapiro-Wilks con un valor de 0.07. Debido a que el p-value es mayor a 0.05, se concluye que los datos se distribuyen normalmente.

1. Independencia

La forma de verificar independencia es que no se aprecien patrones al graficar los residuos con respecto a las corridas.



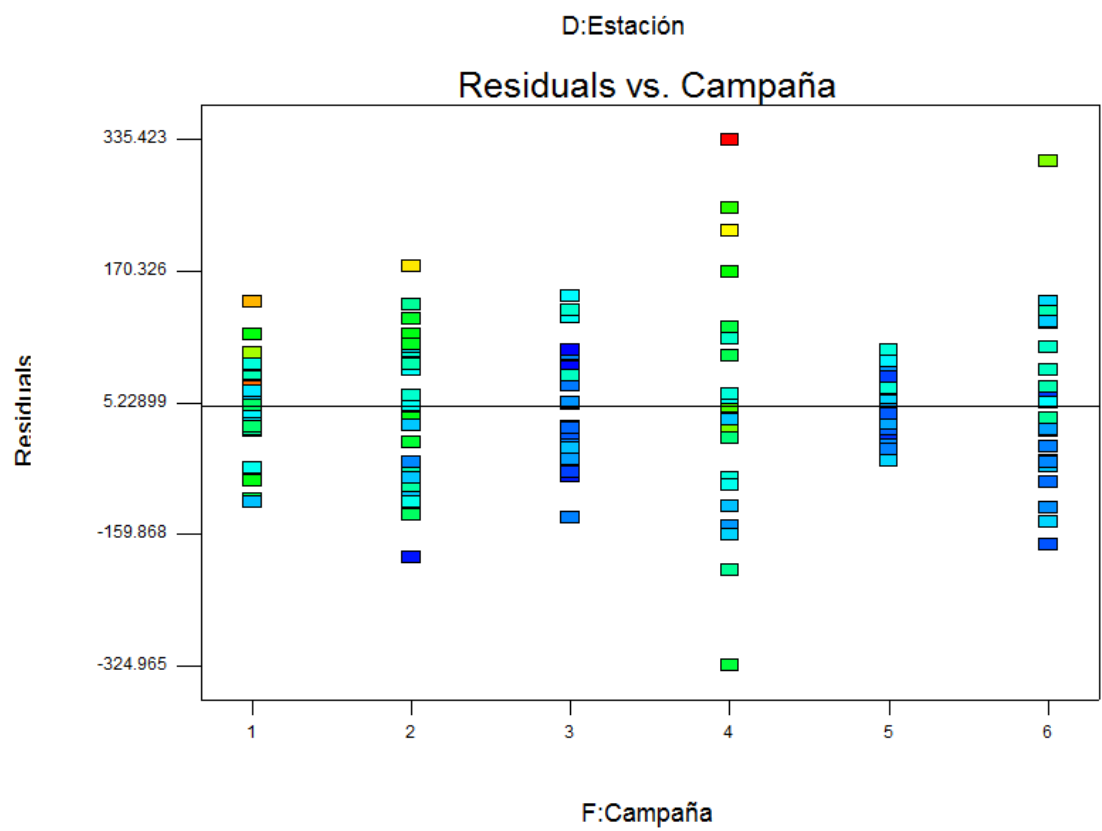
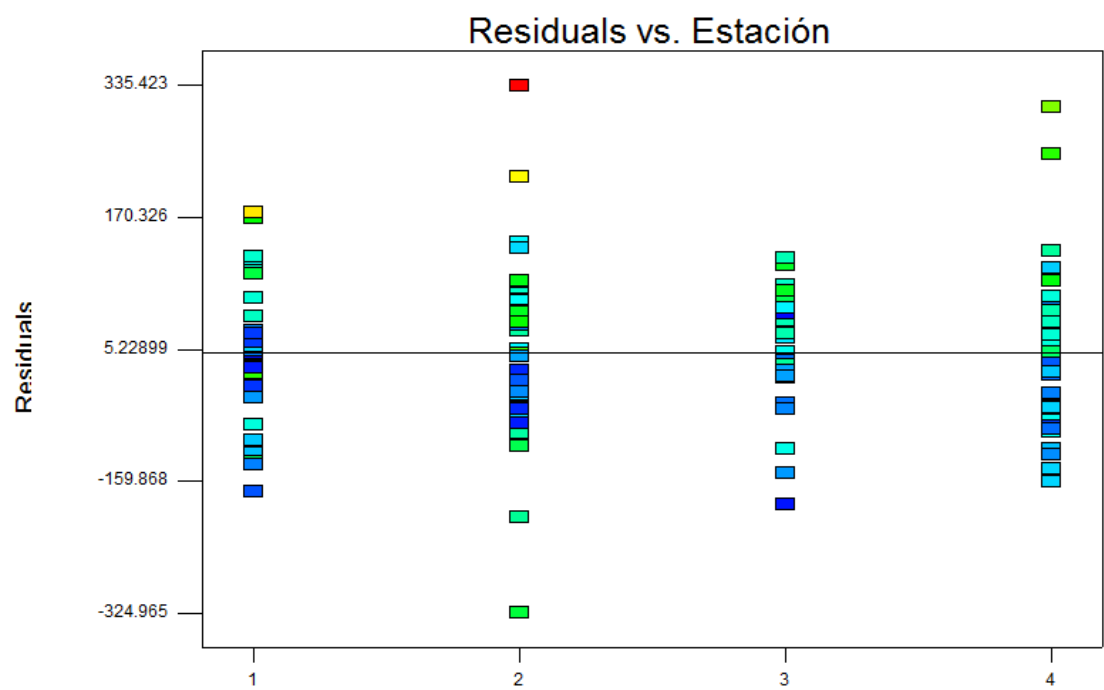
El valor de la auto-correlación de retraso 1, es de 0.04, como regla general se tiene que existen problemas de independencia si ese valor es mayor que $1/\sqrt{N}$ donde N es el número total de datos, en este caso:

$$\frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{141}} = 0.084$$

Debido a que no es mayor se puede concluir que no existen problemas de independencia.

2. Homocedasticidad

La verificación inicial de homocedasticidad se realiza con la gráfica de los residuos por nivel de los factores.



ANEXO 3

REGISTRO FOTOGRAFICO DE LOS PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y DURANTE LOS MUESTREOS DE BIOAEROSOLES



Pesaje de los agares respectivos



Dilución de los agares en agua destilada



Esterilización a 121°C durante 15 minutos en autoclave



Medios de cultivo siendo servidos.



Rotulación de cajas de Petri con medios de cultivo.



Empaque de cajas de Petri.



Refrigeración de cajas de Petri previamente rotuladas y empacadas.



Impactador de cascada de 6 etapas durante uno de los muestreos.



Introducción de cajas de Petri en cada una de las etapas del impactador de cascada.



Montaje en campo para la toma de muestras.

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS

RESUMEN

Los bioaerosoles son partículas de origen biológico que pueden ser generados y dispersados por distintas fuentes en altas concentraciones. La emisión de bioaerosoles en rellenos sanitarios representa un riesgo potencial para la salud de los trabajadores, la cual debe ser controlada. En la presente investigación, se evaluó la concentración de bioaerosoles desde un relleno sanitario ubicado en el departamento del Atlántico, en Colombia. Para esto, se realizaron 6 campañas de monitoreo distribuidas en 4 puntos dentro de las diversas etapas de tratamiento (celda activa: 1, piscinas de lixiviados: 1 y celdas pasivas: 2). Se utilizó un impactador de cascada de 6 etapas operando a 28,3 l/min por 5 min y ubicado a 1,5 m de altura con dos medios de cultivo. El promedio geométrico máximo registrado de aerobacterias fue de 850.18 UFC/m³ durante la jornada de la tarde en la celda activa, mientras que para los aerosoles fúngicos se presentó en la jornada de la mañana en la estación ubicada entre las piscinas de lixiviados, con una concentración de 382.09 UFC/m³. Además, se reportaron altas concentraciones de bioaerosoles respirables resultando perjudiciales a la salud por el tamaño que les permite viajar rápidamente por acción del viento, ser inhalados y llegar a los alvéolos pulmonares y bronquios, afectando principalmente al personal que labora en el relleno sanitario.

Palabras claves

Aerobacterias, aerosoles fungí, bioaerosoles, relleno sanitario, etapas de tratamiento.

ABSTRACT

Aerosols are particles of biological origin which can be generated by different sources and dispersed at high concentrations. The emission of bioaerosols in landfills poses a potential risk to workers health, which must be controlled. In the present investigation, the concentration of bioaerosols was evaluated from a landfill located in the department of Atlántico, Colombia. To this, 6 monitoring campaigns in 4 points within the various treatment stages (active cell: 1, leachate pools: 1 and passive cells: 2) were performed. A six-stage cascade impactor operating at 28.3 L/min for 5 min and located at 1.5 m high with two culture media was used. The maximum geometric average registered for aerobacterias was 850.18 CFU/m³ in the afternoon at the active cell, while for fungal aerosols were presented in the morning at the station located between the leachate pools, with a concentration of 382.09 CFU/m³. In addition, high concentrations of respirable bioaerosols harmful to health resulting from the size that allows them to travel quickly by wind, be inhaled and reach the pulmonary alveoli and bronchi, mainly affecting the personnel working at the landfill were reported.

Keywords

Aerobacterias, fungal aerosols, bioaerosols, landfill, treatment stages.

